刘政军　徐德昆　等编著

不锈钢焊接及质量控制

The Second Edition
第二版

BUXIUGANG HANJIE
JI ZHILIANG KONGZHI

化学工业出版社

不锈钢焊接及质量控制



刘政军　徐德昆　等编著

BUXIUGANG HANJIE
JI ZHILIANG KONGZHI

化学工业出版社
·北京·

本书以表格形式列出了不锈钢的分类、不锈钢牌号及其化学成分、力学性能、耐蚀性能、物理性能参数、用途等常用资料，介绍了各元素对不锈钢性能的影响，国内外不锈钢牌号表示方法。介绍了各类型不锈钢的焊接材料（包括焊条、焊丝、焊带、焊剂、保护气体等）、焊接工艺及施焊操作要点。讲述了焊接缺欠产生的原因、危害及预防措施。列举了许多典型不锈钢焊接工程实例。介绍了焊接质量控制环节、控制点及控制要求，焊接作业人员的培训与考核方法、焊接工艺评定常见的问题、不锈钢酸洗钝化工艺及酸洗钝化后的检验要求。

本书可供焊接、锅炉、压力容器等行业的工程技术人员查阅和参考。

图书在版编目（CIP）数据

不锈钢焊接及质量控制/刘政军，徐德昆等编著．—2版．
北京：化学工业出版社，2015.2
ISBN 978-7-122-22504-7

Ⅰ.①不… Ⅱ.①刘…②徐… Ⅲ.①不锈钢-焊接-质量控制 Ⅳ.①TG457.11

中国版本图书馆CIP数据核字（2014）第288695号

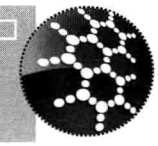
责任编辑：张兴辉　　文字编辑：陈　喆
责任校对：宋　玮　　装帧设计：王晓宇

出版发行：化学工业出版社（北京市东城区青年湖南街13号　邮政编码100011）
印　　刷：北京永鑫印刷有限责任公司
装　　订：三河市宇新装订厂
787mm×1092mm　1/16　印张24½　字数614千字　2015年3月北京第2版第1次印刷

购书咨询：010-64518888（传真：010-64519686）
售后服务：010-64518899
网　　址：http://www.cip.com.cn
凡购买本书，如有缺损质量问题，本社销售中心负责调换。

定　　价：98.00元

版权所有　违者必究



第二版前言

本书第一版出版后得到了广大读者的关注，销量一直很好，为了回馈广大读者对本书的关爱，笔者在保留原作品的精华的基础之上对原著做了补充与修订。修订后本书与第一版的变化如下。

1. 增加了如下内容。

（1）第1章增加了“不锈钢锻件材料牌号、化学成分、力学性能”；“常用中外不锈钢钢管、钢板的牌号、化学成分、常温力学性能”。

（2）第2章增加了“承压设备焊接用不锈钢焊丝、焊条、焊剂的技术要求”；“不锈钢焊带”；“不同标准之间的焊丝、焊带的化学成分对比”；“常用不锈钢国外焊接材料牌号、化学成分、力学性能”。

（3）第7章增加了“中外双相不锈钢管标准及材料牌号和化学成分”。

（4）第10章增加了“不锈钢酸洗钝化工艺”；“承压设备焊接工艺评定报告转化确认”。

（5）为了便于读者阅读，此次修订过程对原书中的部分国外材料牌号增加了注释。

2. 删除了“GB/T 4239—1991《不锈钢和耐热钢冷轧钢带》”相关内容。

3. 修订了如下内容。

（1）修订了第一版的错误或不当之处。

（2）书中出现的标准代号及其名称或技术规范按最新版本做了修订。按最新版本的不锈钢材料标准修订第1章母材的材料牌号（将旧牌号用括号括起，并增减部分材料牌号）、化学成分、力学性能（并修订了材料力学性能符号），修订不锈钢材料牌号表示方法。第2章焊接材料的材料牌号（将旧牌号用括号括起，并增减部分材料牌号）、化学成分、力学性能（并修订材料力学性能符号）。

（3）第10章修订了不锈钢焊接工艺评定技术要求。

（4）修订了特种设备焊接操作人员考试与复审要求。

（5）修订了焊接接头表面质量要求，增加焊接接头表面不允许有未焊透、未熔合、未填满等质量控制要求。

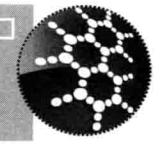
本书第二版编写与修订主要由沈阳锅炉制造有限责任公司（原工作单位：沈阳空气压缩机制造厂）徐德昆和沈阳工业大学刘政军主要负责。沈阳特种设备检测研究院郝雪枫、原锦西化工机械（集团）有限公司姜殿臣、营口庆营石油化工设备有限公司钱成伟等参加了编写与修订工作。编写人员分工如下：第3章由沈阳特种设备检测研究院郝雪枫编写，第10章的第10.9节由原锦西化工机械（集团）有限公司姜殿臣、营口庆营石油化工设备有限公司钱成伟编写，其余各章节由沈阳锅炉制造有限责任公司徐德昆编写，全书由沈阳工业大学刘政军审定。在编写过程中，得到了一些学校和科研单位、企业的支持，在此表示深深的谢意。

由于编著者水平有限，书中不足之处在所难免，欢迎广大读者批评指正。

编著者

CONTENTS

不锈钢焊接及质量控制



目 录

第1章 不锈钢的基本知识 1

1.1 不锈钢的分类及化学成分 …… 1
1.1.1 不锈钢的分类 …… 1
1.1.2 不锈钢的化学成分 …… 16
1.2 不锈钢的性能 …… 16
1.2.1 不锈钢的物理性能 …… 16
1.2.2 不锈钢的力学性能 …… 16
1.2.3 不锈钢的耐热性能 …… 38
1.3 不锈钢的耐蚀性能 …… 40
1.3.1 均匀腐蚀 …… 40
1.3.2 点腐蚀 …… 41
1.3.3 缝隙腐蚀 …… 41
1.3.4 晶间腐蚀 …… 41
1.3.5 应力腐蚀 …… 42
1.4 各种合金元素对不锈钢组织和性能的影响 …… 42
1.4.1 铬、硅、铝对不锈钢组织和性能的影响 …… 42
1.4.2 镍对不锈钢组织和性能的影响 …… 42
1.4.3 钼和铜对不锈钢组织和性能的影响 …… 43
1.4.4 锰和氮对不锈钢组织和性能的影响 …… 43
1.4.5 钛和铌对不锈钢组织和性能的影响 …… 43
1.4.6 碳对不锈钢组织和性能的影响 …… 43
1.5 各国不锈钢牌号表示方法 … 44
1.5.1 中国不锈钢牌号表示方法 …… 44
1.5.2 国外不锈钢牌号表示方法 …… 45
1.5.3 中国、美国、日本等国家不锈钢标准目录 … 47
1.5.4 国内外主要不锈钢牌号 …… 49
1.6 马氏体不锈钢、沉淀硬化不锈钢的热处理制度 …… 62
参考文献 …… 66

第2章 不锈钢焊接用焊接材料 67

2.1 不锈钢焊接用焊条 …… 67
2.1.1 对不锈钢焊条的要求 … 67
2.1.2 不锈钢焊条的型号 …… 67
2.1.3 不锈钢焊条牌号 …… 71
2.1.4 不锈钢焊条主要用途 … 72
2.1.5 防止施焊过程中焊条尾部发红的措施 …… 80
2.2 不锈钢焊丝与焊带 …… 97
2.2.1 实心焊丝 …… 97
2.2.2 药芯不锈钢焊丝 …… 121
2.2.3 不锈钢焊带 …… 130
2.3 不锈钢埋弧焊用焊剂 …… 143
2.3.1 焊剂的作用 …… 143
2.3.2 焊剂的分类 …… 143
2.4 不锈钢焊接用气体、器具和钨极 …… 150
2.4.1 不锈钢焊接用气体 …… 150
2.4.2 不锈钢焊接用器具 …… 152
2.4.3 钨极 …… 154
2.5 国外不锈钢焊接材料简介 …… 156
2.5.1 各国不锈钢焊条型号对应关系 …… 156
2.5.2 各国不锈钢焊丝型号对应关系 …… 156
参考文献 …… 162

第 3 章　不锈钢的焊接性能　163

3.1　不锈钢的腐蚀机理 …… 163
3.2　奥氏体不锈钢的焊接性 …… 166
3.2.1　奥氏体不锈钢焊接接头的晶间腐蚀 …… 167
3.2.2　应力腐蚀开裂 …… 168
3.2.3　焊接接头的热裂纹 …… 169
3.2.4　奥氏体不锈钢焊接接头的力学性能 …… 171
3.3　马氏体钢及铁素体钢的焊接性 …… 171
3.3.1　马氏体钢的焊接性 …… 171
3.3.2　铁素体钢的焊接性 …… 172
3.4　异种钢焊接性 …… 172
3.4.1　异种钢焊接存在的问题 …… 172
3.4.2　异种钢的焊接法 …… 173
3.4.3　复合钢的焊接 …… 175
参考文献 …… 175

第 4 章　奥氏体型不锈钢的焊接　176

4.1　焊条电弧焊 …… 176
4.1.1　焊条电弧焊的弧焊电源 …… 176
4.1.2　焊条电弧焊的操作技术 …… 177
4.1.3　焊前准备 …… 180
4.1.4　装配定位焊 …… 187
4.1.5　焊接工艺 …… 188
4.2　埋弧焊 …… 192
4.2.1　焊接设备 …… 192
4.2.2　辅助设备 …… 193
4.2.3　焊前准备 …… 194
4.2.4　埋弧焊工艺 …… 198
4.2.5　焊剂自动回收 …… 205
4.3　气体保护焊 …… 205
4.3.1　钨极惰性气体保护电弧焊 …… 206
4.3.2　钨极脉冲氩弧焊 …… 224
4.3.3　熔化极气体保护焊 …… 227
4.4　等离子弧焊 …… 234
4.4.1　等离子弧焊工作原理及特点 …… 234
4.4.2　等离子弧焊分类及焊接参数 …… 235
4.5　不锈钢焊接的工程实例 …… 237
4.5.1　埋弧焊焊接 30m³ 奥氏体不锈钢发酵罐 …… 237
4.5.2　钨极氩弧焊焊接不锈钢薄壁管 …… 238
4.5.3　钨极旋转氩弧焊焊接不锈钢导管 …… 239
4.5.4　不锈钢管路环缝内保护装置及焊接工艺 …… 240
4.5.5　熔化极混合气体保护焊焊接中、厚不锈钢钢板 …… 241
4.5.6　埋弧焊焊接中厚不锈钢钢板 …… 243
4.6　设计温度较低的奥氏体不锈钢制压力容器焊接要求 …… 244
参考文献 …… 245

第 5 章　铁素体型不锈钢的焊接　246

5.1　铁素体型不锈钢的焊接特点 …… 246
5.1.1　焊接接头的晶间腐蚀 …… 246
5.1.2　焊接接头的脆化 …… 248
5.1.3　铁素体型不锈钢的焊接工艺原则 …… 249
5.2　铁素体型不锈钢的焊接方法 …… 250
5.2.1　普通纯度铁素体不锈钢的焊接方法 …… 250
5.2.2　高纯度高铬铁素体不锈钢 …… 253
参考文献 …… 256

第 6 章　马氏体型不锈钢的焊接　257

6.1　马氏体型不锈钢的焊接特点 …… 257
6.1.1　焊接接头的冷裂纹 …… 257
6.1.2　焊前预热和焊后热处理 …… 257
6.1.3　焊接方法的选择 …… 259
6.1.4　控制焊缝金属的化学成分 …… 259
6.2　马氏体型不锈钢的焊条电弧焊工艺 …… 260
6.2.1　焊前准备 …… 260
6.2.2　马氏体型不锈钢的焊接方法与焊接工艺参数 …… 260
6.3　马氏体型不锈钢工程焊接实例 …… 264
6.3.1　3Cr13 钢压力阀套的焊接 … 264
6.3.2　煤仓漏斗 4Cr13 钢衬板的焊接 …… 265
6.3.3　发电机的复环与叶片焊接 …… 267
6.3.4　高温风机部件 Cr13 型不锈钢叶轮的修复 …… 268
6.3.5　混流式水轮转轮的焊接 …… 268
参考文献 …… 269

第 7 章　双相不锈钢的焊接　270

7.1　双相不锈钢的焊接性 …… 270
7.1.1　双相不锈钢简介 …… 270
7.1.2　双相不锈钢的焊接性 …… 286
7.1.3　双相不锈钢焊接要点 …… 287
7.2　Cr18 型双相不锈钢的焊接 …… 289
7.2.1　焊接性 …… 289
7.2.2　Cr18 型双相不锈钢的焊接工艺 …… 289
7.3　Cr21 型双相不锈钢的焊接 …… 290
7.3.1　焊接性 …… 290
7.3.2　焊接方法与焊接要点 …… 290
7.4　Cr22 型双相不锈钢的焊接 …… 291
7.4.1　焊接方法 …… 291
7.4.2　焊接材料 …… 291
7.4.3　预热与焊后热处理 …… 291
7.5　Cr23 型双相不锈钢的焊接 …… 291
7.6　Cr25 型双相不锈钢的焊接 …… 292
7.7　工程实例 …… 295
符号说明 …… 297
参考文献 …… 297

第 8 章　沉淀硬化型不锈钢的焊接　299

8.1　沉淀硬化型不锈钢简介 …… 299
8.1.1　半奥氏体沉淀硬化不锈钢 …… 299
8.1.2　奥氏体沉淀硬化不锈钢 …… 301
8.1.3　马氏体沉淀硬化型不锈钢 …… 302
8.2　沉淀硬化不锈钢的焊接性 …… 303
8.2.1　半奥氏体型沉淀硬化不锈钢的焊接性 …… 303
8.2.2　马氏体沉淀硬化和时效硬化不锈钢的焊接性 …… 303
8.2.3　奥氏体沉淀硬化型不锈钢的焊接性 …… 304
8.3　半奥氏体型沉淀硬化不锈钢的焊接工艺 …… 304
8.3.1　焊接特点 …… 304
8.3.2　焊接方法 …… 304
8.3.3　焊接材料的选择 …… 304
8.4　马氏体型沉淀不锈钢的焊接 …… 306
8.4.1　材料牌号 …… 306
8.4.2　焊接材料及焊接参数 …… 306
8.5　工程实例 …… 306
8.5.1　沉淀硬化型不锈钢容器的焊接 …… 306
8.5.2　离心式二氧化碳压缩机叶轮的焊接 …… 307
符号说明 …… 308
参考文献 …… 308

第 9 章　不锈钢同其他金属材料的焊接　309

9.1　异种金属焊接的特点 …… 310
9.1.1　异种金属熔焊的主要问题 …… 310
9.1.2　异种金属熔焊的焊接性 …… 310
9.2　奥氏体型不锈钢与珠光体钢的焊接 …… 312
9.2.1　焊接性分析 …… 312
9.2.2　焊接工艺 …… 314
9.2.3　工程实例 …… 320
9.3　奥氏体型不锈钢与铁素体型不锈钢的焊接 …… 321
9.3.1　焊接性 …… 321
9.3.2　预热温度及回火温度 …… 321
9.3.3　焊接材料 …… 322
9.3.4　焊接工艺 …… 322
9.4　奥氏体型不锈钢与马氏体型不锈钢的焊接 …… 322
9.4.1　焊接性 …… 322
9.4.2　预热温度及回火温度 …… 322
9.4.3　焊接材料 …… 323
9.4.4　焊接工艺 …… 323
9.4.5　工程实例 3Cr13 与 1Cr18Ni9Ti 异种钢高压管焊接 …… 324
9.5　不同钢号的奥氏体型不锈钢的焊接 …… 325
9.6　铁素体型不锈钢与碳素钢的焊接 …… 326
9.6.1　焊接性 …… 326
9.6.2　焊接工艺措施 …… 326
9.6.3　工程实例 1Cr17 与 Q235 的焊条电弧焊 …… 328
9.7　铁素体型不锈钢与马氏体型不锈钢的焊接 …… 328
9.7.1　焊接特点 …… 328
9.7.2　焊接工艺 …… 329
9.8　马氏体型不锈钢与珠光体钢的焊接 …… 330
9.8.1　马氏体型不锈钢与珠光体钢的焊接性 …… 330
9.8.2　焊接材料的选用 …… 330
9.8.3　坡口形式 …… 331
9.8.4　预热温度与道间温度 …… 332
9.8.5　焊后温度的控制及热处理 …… 332
9.8.6　焊接方法、操作工艺及注意事项 …… 332
9.8.7　工程实例 1Cr13 与 Q235 的电弧焊 …… 332
9.9　不锈复合钢板的焊接 …… 333
9.9.1　对不锈复合钢板的要求 …… 333
9.9.2　不锈复合钢板的焊接性 …… 334
9.9.3　不锈复合钢板的焊接工艺 …… 335
9.9.4　焊缝金属的晶间腐蚀试验 …… 343
9.9.5　焊后热处理 …… 343
9.9.6　工程实例 …… 343
参考文献 …… 348

第 10 章　不锈钢焊接质量控制　349

10.1　焊工管理 …… 349
10.1.1　焊工的培训与考试管理 … 349
10.1.2　焊工的持证上岗管理 …… 354
10.1.3　特种设备焊工复审管理 … 355
10.2　材料的质量控制 …… 355
10.2.1　母材的质量控制 …… 356
10.2.2　焊接材料的管理 …… 356
10.3　焊接工艺评定 …… 360
10.3.1　焊接工艺评定、试验方法和合格标准 …… 360
10.3.2　焊接工艺评定的时机要求 …… 360
10.3.3　耐蚀评定 …… 360
10.3.4　焊接工艺评定不得外输入 …… 360
10.3.5　焊接工艺评定的一般过程 …… 360
10.3.6　焊接工艺评定试验 …… 360
10.3.7　焊接工艺评定报告 …… 361
10.3.8　奥氏体不锈钢制的低温

焊接工艺评定值得注意的问题 …… 363
10.3.9 焊接工艺评定报告与预焊接工艺规程编号规则 …… 364
10.4 焊接工艺文件 …… 364
10.4.1 焊接工艺文件的种类 …… 365
10.4.2 焊接工艺文件的编制、审核 …… 366
10.4.3 焊接工艺文件的更改 …… 367
10.5 产品焊接试件 …… 367
10.5.1 试件的制备 …… 367
10.5.2 试件与试样制备和试验 … 368
10.6 产品施焊管理 …… 369
10.6.1 制造环境 …… 369
10.6.2 加工成形过程的质量控制 …… 369
10.6.3 焊接环境 …… 369
10.6.4 装配焊接质量的控制 …… 370
10.6.5 施焊过程 …… 370
10.6.6 焊接工艺纪律 …… 372
10.6.7 焊接检验与焊后表面处理 …… 373
10.7 焊接返修 …… 374
10.7.1 一次返修 …… 374
10.7.2 二次返修 …… 375
10.7.3 超次返修 …… 375
10.7.4 焊接返修应注意的事项 … 376
10.7.5 提高焊缝无损检测一次合格率的质量管理活动 … 377
10.8 焊接设备管理 …… 377
10.8.1 焊接设备完好状态管理 … 378
10.8.2 焊接设备仪表的计量周期检定 …… 379
10.9 质量手册和程序文件的相关内容 …… 379
10.9.1 质量手册的相关内容 …… 379
10.9.2 质量体系程序文件的相关内容 …… 379
10.9.3 其他支持性文件的相关内容 …… 379
10.9.4 焊接质量控制系统质控表的应用 …… 380
10.10 产品设计结构 …… 380

附录 381

附录 A 关于承压设备在执行 NB/T 47014—2011 前完成的焊接工艺评定其有效性的确认 …… 381
附录 B 承压设备焊接工艺评定报告转化确认 …… 382
附录 C 焊接工艺评定一览表 …… 382
附录 D 不锈钢产品酸洗钝化工艺 …… 383
参考文献 …… 384

第1章 不锈钢的基本知识

不锈钢是指在大气、水、酸、碱和盐或其他介质中具有一定化学稳定性的钢的总称。一般来讲，耐大气、蒸汽和水等弱介质腐蚀的钢称为不锈钢，而将其中耐酸、碱和盐等腐蚀性强的钢称为耐蚀钢，或耐酸钢。不锈钢具有不锈性，但不一定耐腐蚀，而耐腐蚀钢一般具有较好的不锈性。

从合金元素构成来讲，不锈钢是在普通碳钢的基础上，加入12%以上的Cr（铬），铬在钢表面形成坚固致密的Cr_2O_3氧化膜，使钢与大气或腐蚀介质隔离而免遭腐蚀。若在此基础上加入一定量的Si（硅）、Al（铝）等合金元素会提高钢的抗氧化性；加入Mo（钼）、W（钨）、V（矾）、Ti（钛）等合金元素能形成细小的弥散的碳化物，起弥散强化作用，提高钢的室温和高温强度；加入Ni（镍）、Mo（钼）、Cu（铜）、Nb（铌）、Ti（钛）、Si（硅）等合金元素，则能使钢具有耐腐蚀性、抗高温氧化或具有高温强度等性能。

不锈钢不仅具有很强的化学稳定性，同时也有足够的强度和塑性，并且在一定高温或低温条件下具有稳定的力学性能和耐腐蚀性能。

由于不锈钢具有上述独特的性能，所以不锈钢被广泛用于石油化工、医疗、食品、电力、交通、军工、原子能、航天等领域的设备中。

1.1 不锈钢的分类及化学成分

目前各国不锈钢牌号已超过百种（GB/T 20878—2007《不锈钢和耐热钢牌号及化学成分》包含了143个牌号），不锈钢分类方法很多，按照GB/T 13304.2—2008《钢分类　第2部分：按主要质量等级和主要性能或使用特性的分类》以及国际上通用的分类方法（按钢的金相组织划分），不锈钢分为5类，即奥氏体型不锈钢、奥氏体-铁素体型不锈钢、铁素体型不锈钢、马氏体型不锈钢和沉淀硬化型不锈钢。我国国家标准规定的不锈钢和耐热钢的牌号、化学成分、组织形态见表1-1～表1-6。

1.1.1 不锈钢的分类

不锈钢的分类方法通常以金相组织进行分类。按金相组织分类为：奥氏体（A）型不锈钢、铁素体（F）型不锈钢、马氏体（M）型不锈钢、奥氏体-铁素体（A-F）型双相不锈钢和沉淀硬化（PH）型不锈钢。这几类不锈钢之间的成分如图1-1所示。

表 1-1 不锈钢钢板、钢棒的牌号、化学成分[2~5]

类别	牌号	化学成分(质量分数)/%											标准
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	N	其他元素	
奥氏体型	12Cr17Mn6Ni5N (1Cr17Mn6Ni5N)	0.15	1.00	5.50～7.50	0.050	0.030	3.50～5.50	16.00～18.00	—	—	0.05～0.25	—	①
	12Cr18Mn9Ni5N (1Cr18Mn8Ni5N)	0.15	1.00	7.50～10.00	0.050	0.030	4.00～6.00	17.00～19.00	—	—	0.05～0.25	—	
	12Cr17Ni7 (1Cr17Ni7)	0.15	1.00	2.00	0.045	0.030	6.00～8.00	16.00～18.00	—	—	0.10	—	①、②、③
	022Cr17Ni7	0.030	1.00	2.00	0.045	0.030	6.00～8.00	16.00～18.00	—	—	0.20	—	②[a]、③[a]
	022Cr17Ni7N	0.030	1.00	2.00	0.045	0.030	6.00～8.00	16.00～18.00	—	—	0.07～0.20	—	②[a]、③[a]
	12Cr18Ni9 (1Cr18Ni9)	0.15	1.00	2.00	0.045	0.030	8.00～10.00	17.00～19.00	—	—	0.10	—	①
		0.15	0.75	2.00	0.045	0.030	8.00～10.00	17.00～19.00	—	—	0.10	—	②、③、④
	Y12Cr18Ni9 (Y1Cr18Ni9)	0.15	1.00	2.00	0.20	≥0.15	8.00～10.00	17.00～19.00	(0.60)	—	—	—	①
	Y12Cr18Ni9Se (Y1Cr18Ni9Se)	0.15	1.00	2.00	0.20	0.060	8.00～10.00	17.00～19.00	—	—	—	Se ≥0.15	①
	12Cr18Ni9Si3 (1Cr18Ni9Si3)	0.15	2.00～3.00	2.00	0.045	0.030	8.00～10.00	17.00～19.00	—	—	0.10	—	②、③、④
	06Cr19Ni10 (0Cr18Ni9)	0.08	1.00	2.00	0.045	0.030	8.00～11.00	18.00～20.00	—	—	—	—	①
		0.08	0.75	2.00	0.045	0.030	8.00～10.50	18.00～20.00	—	—	0.10	—	②[a]、③[a]
	06Cr19Ni9 (0Cr18Ni9)	0.08	0.75	2.00	0.045	0.030	8.00～10.50	18.00～20.00	—	—	0.10		④[a]
	06Cr20Ni11	0.08	0.75	2.00	0.045	0.030	8.00～12.00	19.00～21.00	—	—	0.10		④
	16Cr23Ni13 (2Cr23Ni13)	0.20	0.75	2.00	0.045	0.030	12.00～15.00	22.00～24.00	—	—	—	—	④
	022Cr19Ni10 (00Cr19Ni10)	0.030	1.00	2.00	0.045	0.030	8.00～12.00	18.00～20.00	—	—	—	—	①
		0.030	0.75	2.00	0.045	0.030	8.00～12.00	18.00～20.00	—	—	0.10	—	②[a]、③[a]
	07Cr19Ni10	0.04～0.10	0.75	2.00	0.045	0.030	8.00～10.50	18.00～20.00	—	—	—	—	②[a]、③[a]、④
	05Cr19Ni10	0.04～0.06	0.75	2.00	0.045	0.030	8.00～10.50	18.00～20.00	—	—	—	—	②[a]
	05Cr19Ni10Si2N	0.04～0.06	1.00～2.00	0.80	0.045	0.030	9.00～10.00	18.00～19.00	—		0.12～0.18	Ce:0.03～0.08	③

续表

类别	牌号	化学成分（质量分数）/%											标准
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	N	其他元素	
奥氏体型	06Cr18Ni9Cu3（0Cr18Ni9Cu3）	0.08	1.00	2.00	0.045	0.030	8.50～10.50	17.00～19.00			3.00～4.00	—	①
	06Cr19Ni10N（0Cr19Ni9N）	0.08	1.00	2.00	0.045	0.030	8.00～11.00	18.00～20.00	—	—	0.10～0.16	—	①
		0.08	0.75	2.00	0.045	0.030	8.00～10.50	18.00～20.00	—	—	0.10～0.16	—	②[a]、③[a]
	06Cr19Ni9NbN（0Cr19Ni10NbN）	0.08	1.00	2.00	0.045	0.030	7.50～10.50	18.00～20.00	—	—	0.15～0.30	Nb：0.15	①
		0.08	1.00	2.50	0.045	0.030	7.50～10.50	18.00～20.00	—	—	0.15～0.30	Nb：0.15	③[a]
		0.08	1.00	2.50	0.045	0.030	7.50～10.50	18.00～20.00	—	—	0.15～0.30	Nb：0.15	②[a]
	022Cr19Ni10N（00Cr18Ni10N）	0.030	1.00	2.00	0.045	0.030	8.00～11.00	18.00～20.00	—	—	0.10～0.16	—	①
		0.030	0.75	2.00	0.045	0.030	8.00～11.50	18.00～20.00	—	—	0.10～0.16		②
		0.030	0.75	2.00	0.045	0.030	8.00～12.00	18.00～20.00	—	—	0.10～0.16		③[a]
	10Cr18Ni12（1Cr18Ni12）	0.12	1.00	2.00	0.045	0.030	10.50～13.00	17.00～19.00					①
		0.12	0.75	2.00	0.045	0.030	12.00～15.00	22.00～24.00	—	—	—	—	②、③
	06Cr23Ni13（0Cr23Ni13）	0.08	1.00	2.00	0.045	0.030	12.00～15.00	22.00～24.00	—	—	—	—	①
		0.080	0.75	2.00	0.045	0.030	12.00～15.00	22.00～24.00	—	—	—	—	②、③、④
	06Cr25Ni20（0Cr25Ni20）	0.08	1.50	2.00	0.045	0.030	19.00～22.00	24.00～26.00	—	—	—	—	①、②、③、④
	022Cr25Ni22Mo2N	0.020	0.50	2.00	0.030	0.010	20.50～23.50	24.00～26.00	1.60～2.60	—	0.09～0.15	—	②[a]、③[a]
	06Cr17Ni12Mo2（0Cr17Ni12Mo2）	0.08	1.00	2.00	0.045	0.030	10.00～14.00	16.00～18.00	2.00～3.00	—	—	—	①
		0.08	0.75	2.00	0.045	0.030	10.00～14.00	16.00～18.00	2.00～3.00	—	0.10	—	②[a]、③[a]、④
	06Cr17Ni12Mo2Nb	0.08	0.75	2.00	0.045	0.030	10.00～14.00	16.00～18.00	2.00～3.00	—	0.10	Nb：10C～1.10	②、③
	06Cr17Ni12Mo2N（0Cr17Ni12Mo2N）	0.08	1.00	2.00	0.045	0.030	10.00～13.00	16.00～18.00	2.00～3.00	—	0.10～0.16	—	①
		0.08	0.75	2.00	0.045	0.030	10.00～14.00	16.00～18.00	2.00～3.00	—	0.10～0.16	—	②[a]、③[a]
	022Cr17Ni12Mo2N（00Cr17Ni13Mo2N）	0.030	1.00	2.00	0.045	0.030	10.00～13.00	16.00～18.00	2.00～3.00	—	0.10～0.16	—	①
		0.030	0.75	2.00	0.045	0.030	10.00～14.00	16.00～18.00	2.00～3.00	—	0.10～0.16	—	②[a]、③[a]

续表

类别	牌号	化学成分（质量分数）/%											标准
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	N	其他元素	
奥氏体型	022Cr17Ni12Mo2（00Cr17Ni14Mo2）	0.030	1.00	2.00	0.045	0.030	10.00～14.00	16.00～18.00	2.00～3.00	—	—	—	①
		0.030	0.75	2.00	0.045	0.030	10.00～14.00	16.00～18.00	2.00～3.00	—	0.10	—	②[a]、③[a]
	06Cr17Ni12Mo2Ti（0Cr18Ni12Mo3Ti）	0.08	1.00	2.00	0.045	0.030	10.00～14.00	16.00～18.00	2.00～3.00	—	—	Ti≥5C	①
		0.08	0.75	2.00	0.045	0.030	10.00～14.00	16.00～18.00	2.00～3.00	—	—	Ti≥5C	②[a]、③[a]
	06Cr18Ni12-Mo2Cu2（0Cr18Ni12-Mo2Cu2）	0.08	1.00	2.00	0.045	0.030	10.00～14.00	17.00～19.00	1.20～2.75	1.00～2.50	—	—	①、②、③
	022Cr18Ni14-Mo2Cu2（00Cr18Ni14-Mo2Cu2）	0.030	1.00	2.00	0.045	0.030	12.00～16.00	17.00～19.00	1.20～2.750	1.00～2.50	—	—	①
	03Cr18Ni16Mo5（0Cr18Ni16Mo5）	0.04	1.00	2.50	0.045	0.030	15.00～17.00	16.00～19.00	4.00～6.00	—	—	—	①
	015Cr21Ni26-Mo5Cu2	0.020	1.00	2.00	0.045	0.030	23.00～28.00	19.00～23.00	4.00～5.00	1.00～2.00	0.10	—	②
		0.020	1.00	2.00	0.045	0.035	23.00～28.00	19.00～23.00	4.00～5.00	1.00～2.00	0.10	—	③
	06Cr19Ni13Mo3（0Cr19Ni13Mo3）	0.08	1.00	2.00	0.045	0.030	11.00～15.00	18.00～20.00	3.00～4.00	—	—	—	①
		0.08	0.75	2.00	0.045	0.030	11.00～15.00	18.00～20.00	3.00～4.00	—	0.10	—	②[a]、③[a]④
	022Cr19Ni13Mo3（00Cr19Ni13Mo3）	0.030	1.00	2.00	0.045	0.030	11.00～15.00	18.00～20.00	3.00～4.00	—		—	①
		0.030	0.75	2.00	0.045	0.030	11.00～15.00	18.00～20.00	3.00～4.00	—	0.10	—	②、③
	022Cr19Ni16Mo5N	0.030	0.75	2.00	0.045	0.030	13.50～17.50	17.00～20.00	4.00～5.00	—	0.10～0.20	—	②、③
	022Cr19Ni13Mo4N	0.030	0.75	2.00	0.045	0.030	11.00～15.00	18.00～20.00	3.00～4.00	—	0.10～0.22	—	③
	06Cr19Ni13Mo4N	0.030	0.75	2.00	0.045	0.030	11.00～15.00	18.00～20.00	3.00～4.00	—	0.10～0.22	—	②

续表

类别	牌号	化学成分（质量分数）/%											标准
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	N	其他元素	
奥氏体型	06Cr18Ni11Ti（0Cr18Ni10Ti）	0.08	1.00	2.00	0.045	0.030	9.00～12.00	17.00～19.00	—	—	—	Ti：5C～0.7	①
		0.08	0.75	2.00	0.045	0.030	9.00～12.00	17.00～19.00	—	—	0.10	Ti≥5C	②、③
		0.08	0.75	2.00	0.045	0.030	9.00～12.00	17.00～19.00	—	—	—	Ti≥5C	④
	015Cr24Ni22Mo8Mn3CuN	0.020	0.50	2.00～3.00	0.030	0.005	21.00～23.00	24.00～25.00	7.00～8.00	0.30～0.60	0.45～0.55	—	②、③
	022Cr24Ni17Mo5Mn6NbN	0.030	1.00	5.00～7.00	0.030	0.010	16.00～18.00	23.00～25.00	4.00～5.00	—	0.40～0.60	Nb：0.10	②、③
	06Cr18Ni11Nb（0Cr18Ni11Nb）	0.08	1.00	2.00	0.045	0.030	9.00～12.00	17.00～19.00	—	—	—	Nb：10C～1.10	①
		0.08	0.75	2.00	0.045	0.030	9.00～13.00	17.00～19.00	—	—	—	Nb：10C～1.00	③[a]、④[a]
	06Cr18Ni13Si4[15]（0Cr18Ni13Si4）	0.08	3.00～5.00	2.00	0.045	0.030	11.50～15.00	15.00～20.00	—	—	—	—	①
	20Cr25Ni20（2Cr25Ni20）	0.25	1.50	2.00	0.045	0.030	19.00～22.00	24.00～26.00	—	—	—	—	④
	12Cr16Ni35（1Cr16Ni35）	0.15	1.50	2.00	0.045	0.030	33.00～37.00	14.00～17.00	—	—	—	—	④
	16Cr25Ni20Si2（1Cr25Ni20Si2）	0.20	1.50～2.50	1.50	0.045	0.030	18.00～21.00	24.00～27.00	—	—	—	—	④
奥氏体-铁素体型	14Cr18Ni11Si4AlTi（1Cr18Ni11Si4AlTi）	0.10～0.18	3.40～4.00	0.80	0.035	0.030	10.00～12.00	17.50～19.50	—	—	—	Ti：0.40～0.70 Al：0.10～0.30	①、②、③
	022Cr19Ni5Mo3Si2N（00Cr18Ni5Mo3Si2）	0.030	1.30～2.00	1.00～2.00	0.035	0.030	4.50～5.50	18.00～19.50	2.50～3.00	—	0.05～0.12	—	①
		0.030	1.30～2.00	1.00～2.00	0.030	0.030	4.50～5.50	18.00～19.50	2.50～3.00	—	0.05～0.12	—	②、③
	12Cr21Ni5Ti（1Cr21Ni5Ti）	0.09～0.14	0.80	0.80	0.035	0.030	4.80～5.80	20.00～22.00	—	—	—	Ti：5（C－0.02）～0.80	②、③
	022Cr22Ni5Mo3N	0.030	1.00	2.00	0.030	0.020	4.50～6.50	21.00～23.00	2.50～3.50	—	0.08～0.20	—	①、②、③
	022Cr23Ni5Mo3N	0.030	1.00	2.00	0.030	0.020	4.50～6.50	22.00～23.00	3.00～3.50	—	0.14～0.20	—	①、②、③

续表

类别	牌号	化学成分（质量分数）/%											标准
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	N	其他元素	
奥氏体-铁素体型	022Cr23Ni4-MoCuN	0.030	1.00	2.50	0.040	0.030	3.00～5.50	21.50～24.50	0.05～0.60	0.05～0.60	0.05～0.20	—	②、③
	022Cr25Ni6Mo2N	0.030	1.00	2.00	0.035	0.030	5.50～6.50	24.00～26.00	1.20～2.50	—	0.10～0.20	—	①
		0.030	1.00	2.00	0.030	0.030	5.50～6.50	24.00～26.00	1.50～2.50	—	0.10～0.20	—	②、③
	022Cr25Ni7Mo3-WCuN	0.030	1.00	1.00	0.030	0.010	6.00～8.00	24.00～26.00	3.00～4.00	0.50～1.00	0.20～0.30	W：0.50～1.00	②、③
	03Cr25Ni6Mo3-Cu2N	0.04	1.00	1.50	0.035	0.030	4.50～6.50	24.00～27.00	2.90～3.90	1.50～2.50	0.10～0.25	—	①
		0.04	1.00	1.50	0.040	0.030	4.50～6.50	24.00～27.00	2.90～3.90	1.50～2.50	0.10～0.25	—	②、③
	022Cr25Ni7-Mo4N	0.030	0.80	1.20	0.035	0.020	6.00～8.00	24.00～26.00	3.00～5.00	0.50	0.24～0.32	—	②、③
铁素体型	06Cr13Al（0Cr13Al）	0.08	1.00	1.00	0.040	0.030	(0.60)	11.50～14.50	—	—	—	Al：0.10～0.30	①、②、③
		0.08	1.00	1.00	0.040	0.030	0.60	11.50～14.50	—	—	—	Al：0.10～0.30	④
	022Cr11NbTi	0.030	1.00	1.00	0.040	0.020	(0.60)	10.50～11.70	—	—	0.030	Ti+Nb：[8（C+N）+0.08]～0.75	②、③
	022Cr11NbTi	0.030	1.00	1.00	0.040	0.020	0.60	10.50～11.70	—	—	0.030	Ti+Nb：[8（C+N）+0.08]～0.75	④[a]
	022Cr12Ni	0.030	1.00	1.50	0.040	0.015	0.30～1.00	10.50～12.50	—	—	0.030	—	②、③

续表

类别	牌号	化学成分（质量分数）/%											标准
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	N	其他元素	
铁素体型	022Cr12 (00Cr12)	0.030	1.00	1.00	0.040	0.030	(0.60)	11.00～13.50	—	—	—	—	①
		0.030	1.00	1.00	0.040	0.030	(0.60)	11.00～13.50	—	—	—	—	②、③
	10Cr15 (1Cr15)	0.12	1.00	1.00	0.040	0.030	(0.60)	14.00～16.00	—	—	—	—	②、③
	10Cr17 (1Cr17)	0.12	1.00	1.00	0.040	0.030	(0.60)	16.00～18.00	0.75～1.25	—	—	—	①
		0.12	1.00	1.00	0.040	0.030	0.75	16.00～18.00	—	—	—	—	②、③、④
	022Cr17Ti (00Cr17)	0.030	0.75	1.00	0.035	0.030	—	16.00～19.00	—	—	—	Ti 或 Nb：0.10～1.00	②[a]、③[a]
	Y10Cr17 (Y1Cr17)	0.12	1.00	1.25	0.060	≥0.15	(0.60)	16.00～18.00	(0.60)	—	—	—	①
	10Cr17Mo (1Cr17Mo)	0.12	1.00	1.00	0.040	0.030	(0.60)	16.00～18.00	0.75～1.25	—	—	—	①
		0.12	1.00	1.00	0.040	0.030	—	16.00～18.00	0.75～1.25	—	—	—	②、③
	019Cr18MoTi	0.025	1.00	1.00	0.040	0.030	—	16.00～19.00	0.75～1.50	—	0.025	Ti、Nb、Zr 或其组合：8（C+N）～0.80	②、③
	022Cr18NbTi	0.030	1.00	1.00	0.040	0.015	—	17.50～18.50	—	—	—	Ti：0.10～0.60 Nb：≥0.30+3C	②、③
	019Cr19Mo2NbTi (00Cr18Mo2)	0.025	1.00	1.00	0.040	0.030	1.00	17.50～19.50	1.75～2.50	—	0.035	(Ti+Nb)：[0.20+4（C+N）]～0.80	②、③

续表

类别	牌号	化学成分（质量分数）/%										标准	
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	N	其他元素	
铁素体型	008Cr27Mo（00Cr27Mo）	0.010	0.40	0.40	0.030	0.020	—	25.00～27.50	0.75～1.50	—	0.015	—	①[b]
		0.010	0.40	0.40	0.030	0.020	—	25.00～27.50	0.75～1.50	—	0.015	（Ni+Cu）≤0.50	②、③
	008Cr30Mo2（00Cr30Mo2）	0.010	0.40	0.40	0.030	0.020	—	28.50～32.00	1.50～2.50	—	0.015	—	①[b]
		0.010	0.40	0.40	0.030	0.020	—	28.50～32.00	1.5～2.50	—	0.015	（Ni+Cu）≤0.50	②、③
	16Cr25N（2Cr25N）	0.20	1.00	1.50	0.040	0.03	0.75	23.00～27.00	—	—	0.25	—	④
马氏体型	12Cr12（1Cr12）	0.15	0.50	1.00	0.040	0.030	（0.60）	11.50～13.00	—	—	—	—	①、②、③
		0.15	0.50	1.00	0.040	0.030	0.60	11.50～13.00	—	—	—	—	④
	06Cr13（0Cr13）	0.08	1.00	1.00	0.040	0.030	（0.60）	11.50～13.50	—	—	—	—	①、②、③
	04Cr13Ni5Mo	0.05	0.60	0.50～1.00	0.030	0.030	3.50～5.50	11.50～14.00	0.50～1.00	—	—	—	②、③
	12Cr13（1Cr13）	0.08～0.15	1.00	1.00	0.040	0.030	（0.60）	11.50～13.50	—	—	—	—	①[a]
		0.15	1.00	1.00	0.040	0.030	（0.60）	11.50～13.50	—	—	—	—	②[a]、③[a]
	12Cr13（1Cr13）	0.15	1.00	1.00	0.040	0.030	0.75	11.50～13.50	0.50	—	—	—	④[a]
	Y12Cr13（Y1Cr13）	0.15	1.00	1.25	0.060	≥0.15	（0.60）	12.00～14.00	（0.60）	—	—	—	①
	20Cr13（2Cr13）	0.16～0.25	1.00	1.00	0.040	0.030	（0.60）	12.00～14.00	—	—	—	—	①、②、③
	30Cr13（3Cr13）	0.26～0.35	1.00	1.00	0.040	0.030	（0.60）	12.00～14.00	—	—	—	—	①、②、③
	Y30Cr13（Y3Cr13）	0.26～0.35	1.00	1.25	0.060	≥0.15	（0.60）	12.00～14.00	（0.60）	—	—	—	①
	14Cr17Ni2（1Cr17Ni2）	0.11～0.17	0.80	0.08	0.040	0.030	1.50～2.50	16.00～18.00	—	—	—	—	①

续表

类别	牌号	化学成分（质量分数）/%											标准
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	N	其他元素	
马氏体型	13Cr13Mo（1Cr13Mo）	0.08～0.18	0.60	1.00	0.040	0.030	(0.06)	11.50～14.00	0.30～0.60	—	—	—	①
	17Cr16Ni2	0.12～0.22	1.00	1.50	0.040	0.030	1.50～2.50	15.00～17.00	—	—	—	—	①
		0.12～0.20	1.00	1.00	0.025	0.015	2.00～3.00	15.00～18.00	—	—	—	—	②[a]、③[a]
	32Cr13Mo（3Cr13Mo）	0.28～0.35	0.80	1.00	0.040	0.030	(0.06)	12.00～14.00	0.50～1.00	—	—	—	①
	22Cr12NiMoWV（2Cr12NiMoWV）	0.20～0.25	0.50	0.50～1.00	0.025	0.025	0.50～1.00	11.00～12.50	0.90～1.25	—	—	V：0.20～0.30 W：0.90～1.25	④
沉淀硬化型	05Cr15Ni5Cu4Nb	0.07	1.00	1.00	0.040	0.030	3.50～5.50	14.00～15.50		2.50～4.50		Nb：0.15～0.45	①
	05Cr17Ni4Cu4Nb（0Cr17Ni4Cu4Nb）	0.07	1.00	1.00	0.040	0.030	3.00～5.00	15.00～17.50	—	3.00～5.00	—	Nb：0.15～0.45	①、④
	07Cr17Ni7Al（0Cr17Ni7Al）	0.09	1.00	1.00	0.040	0.030	6.50～7.75	16.00～18.00	—	—	—	Al：0.75～1.50	①、②、③、④
	07Cr15Ni7Mo2Al（0Cr15Ni7Mo2Al）	0.09	1.00	1.00	0.040	0.030	6.50～7.75	14.00～16.00	2.00～3.00	—	—	Al：0.75～1.50	①、②、③、④
	04Cr13Ni8Mo2Al	0.05	0.10	0.20	0.010	0.008	7.50～8.50	12.30～13.25	2.00～2.50	—	0.01	Al：0.90～1.35	②[a]、③[a]
	09Cr17Ni5Mo3N	0.07～0.11	0.50	0.50～1.25	0.040	0.030	4.00～5.00	16.00～17.00	2.50～3.20	—	0.07～0.13	—	②[a]、③[a]
	022Cr12Ni9-Cu2NbTi	0.05	0.50	0.50	0.040	0.030	7.50～9.50	11.00～12.50	0.50	1.50～2.50	—	Ti：0.80～1.40（Nb+Ti）：0.10～0.50	②[a]、③[a]、④[a]
	06Cr17Ni7AlTi	0.08	1.00	1.00	0.040	0.030	6.00～7.50	16.00～17.50	—	—	—	Al：0.40 Ti：0.40～1.20	②、③、④

注：1. ①GB/T 1220—2007《不锈钢棒》；②GB/T 3280—2007《不锈钢冷轧钢板和钢带》。③GB/T 4237—2007《不锈钢热轧钢板和钢带》。④GB/T 4238—2007《耐热钢钢板和钢带》。a 表示相对于 GB/T 20878 调整化学成分的牌号。b 表示允许含有小于或等于 0.50%的镍，小于或等于 0.20%的铜，但 Ni+Cu≤0.50%，必要时，可添加上表以外的合金元素。⑤必要时，可添加表中所示以外的合金元素。

2. 表中所列成分除标明范围或最小值外，其余均为最大值。

表 1-2 承压设备用不锈钢锻件的钢号、化学成分[6]

类型	钢号	化学成分(质量分数)/%											
		C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cu	Ti	Nb	N	P	S
铁素体型	S11306	0.06	1.00	1.00	11.50～13.50	0.60	—	—	—	—	—	0.035	0.020
奥氏体型	S30408	0.08	1.00	2.00	18.00～20.00	8.00～10.50	—	—	—	—	—	0.035	0.020
	S30403	0.030	1.00	2.00	18.00～20.00	8.00～12.00	—	—	—	—	—	0.035	0.020
	S30409	0.04～0.10	1.00	2.00	18.00～20.00	8.00～10.50	—	—	—	—	—	0.035	0.020
	S32168	0.08	1.00	2.00	17.00～19.00	9.00～12.00	—	—	5C～0.70	—	—	0.035	0.020
	S34779	0.04～0.10	1.00	2.00	17.00～19.00	9.00～12.00	—	—	—	8C～1.10	—	0.035	0.020
	S32608	0.08	1.00	2.00	16.00～18.00	10.00～14.00	2.00～3.00	—	—	—	—	0.035	0.020
	S31603	0.030	1.00	2.00	16.00～18.00	10.00～14.00	2.00～3.00	—	—	—	—	0.035	0.020
	S31609	0.04～0.10	1.00	2.00	16.00～18.00	10.00～14.00	2.00～3.00	—	—	—	—	0.035	0.020
	S31668	0.08	1.00	2.00	16.00～18.00	10.00～14.00	2.00～3.00	—	5C～0.70	—	—	0.035	0.020
	S31703	0.030	1.00	2.00	18.00～20.00	11.00～15.00	3.00～4.00	—	—	—	—	0.035	0.020
	S31008	0.04～0.08	1.50	2.00	24.00～26.00	19.00～22.00	—	—	—	—	—	0.035	0.020
	S39042	0.020	1.00	2.00	19.00～21.00	24.00～26.00	4.00～5.00	1.20～2.00	—	—	0.10	0.030	0.010

表 1-3　锅炉、热交换器用不锈钢无缝钢管的牌号、化学成分[7]

类别	牌号	化学成分(质量分数)/%										
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	N	其他元素
奥氏体型	12Cr18Ni9	0.15	1.00	2.00	0.035	0.030	8.00～10.00	17.00～19.00	—	—	0.10	—
	06Cr19Ni10	0.08	1.00	2.00	0.035	0.030	8.00～11.00	18.00～20.00	—	—	—	—
	022Cr19Ni10	0.030	1.00	2.00	0.035	0.030	8.00～12.00	18.00～20.00	—	—	—	—
	07Cr19Ni10	0.04～0.10	1.00	2.00	0.035	0.030	8.00～11.00	18.00～20.00	—	—	—	—
	06Cr19Ni10N	0.08	1.00	2.00	0.35	0.030	8.00～11.00	18.00～20.00	—	—	0.10～0.16	—
	022Cr19Ni10N	0.030	1.00	2.00	0.035	0.030	8.00～11.00	18.00～20.00	—	—	0.10～0.16	—
	16Cr23Ni13	0.20	1.00	2.00	0.035	0.030	12.00～15.00	22.00～24.00	—	—	—	—
	06Cr23Ni13	0.08	1.00	2.00	0.035	0.030	12.00～15.00	22.00～24.00	—	—	—	—
	20Cr25Ni20	0.25	1.50	2.00	0.035	0.030	19.00～22.00	24.00～26.00	—	—	—	—
	06Cr25Ni20	0.08	1.50	2.00	0.035	0.030	19.00～22.00	24.00～26.00	—	—	—	—
	06Cr17Ni12Mo2	0.08	1.00	2.00	0.035	0.030	10.00～14.00	16.00～18.00	2.00～3.00	—	—	—
	022Cr17Ni12Mo2	0.030	1.00	2.00	0.035	0.030	10.00～14.00	16.00～18.00	2.00～3.00	—	—	—
	07Cr17Ni12Mo2	0.04～0.10	1.00	2.00	0.035	0.030	10.00～14.00	16.00～18.00	2.00～3.00	—	—	—
	06Cr17Ni12Mo2Ti	0.08	1.00	2.00	0.035	0.030	10.00～14.00	16.00～18.00	2.00～3.00	—	—	Ti：≥5C
	06Cr17Ni12Mo2N	0.08	1.00	2.00	0.035	0.030	10.00～13.00	16.00～18.00	2.00～3.00	—	0.10～0.16	—
	022Cr17-Ni12Mo2N	0.030	1.00	2.00	0.035	0.030	10.00～13.00	16.00～18.00	2.00～3.00	—	0.10～0.16	—
	06Cr18Ni12-Mo2Cu2	0.08	1.00	2.00	0.035	0.030	10.00～14.00	17.00～19.00	1.20～2.75	1.00～2.50	—	—

续表

类别	牌号	化学成分(质量分数)/%										
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	N	其他元素
奥氏体型	022Cr18Ni-14Mo2Cu2	0.030	1.00	2.00	0.035	0.030	12.00～16.00	17.00～19.00	1.20～2.75	1.00～2.50	—	—
	015Cr21Ni26-Mo5Cu2	0.020	1.00	2.00	0.030	0.020	24.00～26.00	19.00～21.00	4.00～5.00	1.20～2.00	0.10	—
	06Cr19Ni13Mo3	0.08	1.00	2.00	0.035	0.030	11.00～15.00	18.00～20.00	3.00～4.00	—	—	—
	022Cr19Ni13Mo3	0.030	1.00	2.00	0.035	0.030	11.00～15.00	18.00～20.00	3.00～4.00	—	—	—
	06Cr18Ni11Ti	0.08	1.00	2.00	0.035	0.030	9.00～12.00	17.00～19.00	—	—	—	Ti:5C～0.70
	07Cr19Ni11Ti	0.04～0.10	0.75	2.00	0.030	0.030	9.00～13.00	17.00～20.00	—	—	—	Ti:4C～0.60
	06Cr18Ni11Nb	0.08	1.00	2.00	0.035	0.030	9.00～12.00	17.00～19.00	—	—	—	Nb:10C～1.10
	07Cr18Ni11Nb	0.04～0.10	1.00	2.00	0.035	0.030	9.00～12.00	17.00～19.00	—	—	—	Nb:8C～1.10
	06Cr18Ni13Si4	0.08	3.00～5.00	2.00	0.035	0.030	11.50～15.00	15.00～20.00	—	—	—	—
铁素体型	10Cr17	0.12	1.00	1.00	0.030	0.030	0.60	16.00～18.00	—	—	—	—
	008Cr27Mo①	0.010	0.40	0.40	0.030	0.020	—	25.00～27.50	0.75～1.50	—	0.015	—
马氏体型	06CCr13	0.08	1.00	1.00	0.035	0.030	0.60	11.50～13.50	—	—	—	—

①允许含有不大于0.50%的Ni，不大于0.20%的Cu，但Ni+Cu的含量应不大于0.50%。

注：表中所列成分除标明范围或最小之外，其余均为最大值。有些牌号的化学成分与GB/T 20878—2007相比有变化。

表1-4 承压设备用奥氏体不锈钢钢板与钢带的牌号、化学成分[8]

统一数字代号	牌号	化学成分(质量分数)/%										
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	N	Cu	其他元素
S30408	06Cr19Ni10	0.08	0.75	2.00	0.035	0.020	8.00～10.50	18.00～20.00	—	0.10	—	—
S30403	022Cr19Ni10	0.030	0.75	2.00	0.035	0.020	8.00～12.00	18.00～20.00	—	—	—	—

续表

统一数字代号	牌号	化学成分(质量分数)/%										
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	N	Cu	其他元素
S30409	07Cr19Ni10	0.04～0.10	0.75	2.00	0.035	0.020	8.00～10.50	18.00～20.00	—	—	—	—
S31008	06Cr25Ni20	0.04～0.08	1.50	2.00	0.035	0.020	19.00～22.00	22.00～26.00	—	—	—	—
S31608	06Cr17Ni12Mo2	0.08	0.75	2.00	0.035	0.020	10.00～14.00	16.00～18.00	2.00～3.00	0.10	—	—
S31603	022Cr17Ni12Mo2	0.030	0.75	2.00	0.035	0.020	10.00～14.00	16.00～18.00	2.00～3.00	0.10	—	—
S31668	06Cr17Ni12Mo2Ti	0.08	0.75	2.00	0.035	0.020	10.00～14.00	16.00～18.00	2.00～3.00	—	—	Ti≥5C
S39042	015Cr21Ni26-Mo5Cu2	0.020	1.00	2.00	0.030	0.010	24.00～26.00	19.00～21.00	4.00～5.00	0.10	1.20～2.00	—
S31708	06Cr19Ni13Mo3	0.08	0.75	2.00	0.035	0.020	11.00～15.00	18.00～20.00	3.00～4.00	0.10	—	—
S31703	022Cr19Ni13Mo3	0.030	0.75	2.00	0.035	0.020	11.00～15.00	18.00～20.00	3.00～4.00	—	—	—
S32168	06Cr18Ni11Ti	0.08	0.75	2.00	0.035	0.020	9.00～12.00	17.00～19.00	—	—	—	Ti≥5C

注：表中有些牌号的化学成分与 GB/T 20878 相比有变化。

表 1-5　承压设备用奥氏体-铁素体不锈钢钢板与钢带的牌号、化学成分[8]

统一数字代号	牌号	化学成分(质量分数)/%										
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	N	其他元素
S21953	022Cr19Ni5-Mo3Si2N	0.030	1.30～2.00	1.00～2.00	0.030	0.020	18.00～19.50	4.50～5.0	2.50～3.00	—	0.05～0.12	—
S22253	022Cr22Ni5Mo3N	0.030	1.00	2.00	0.030	0.020	21.00～23.00	4.50～6.50	2.50～3.50	—	0.08～0.20	—
S22053	022Cr23Ni5Mo3N	0.030	1.00	2.00	0.030	0.020	22.00～23.00	4.50～6.50	3.00～3.50	—	0.14～0.20	—

注：表中有些牌号的化学成分与 GB/T 20878 相比有变化。

表 1-6 承压设备用铁素体不锈钢钢板与钢带的牌号、化学成分[8]

统一数字代号	牌号	化学成分(质量分数)/%									
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N	其他元素
S11348	06Cr13Al	0.08	1.00	1.00	0.035	0.020	11.50～14.50	0.60	—	—	Al:0.10～0.30
S11972	019Cr19Mo2NbTi	0.025	1.00	1.00	0.035	0.020	17.50～19.50	1.00	1.75～2.50	0.035	(Ti+Nb):[0.20+4(C+N)]～0.80
S11306	06Cr13	0.06	1.00	1.00	0.035	0.020	11.50～13.50	0.60	—	—	—

注：表中有些牌号的化学成分与 GB/T 20878 相比有变化。

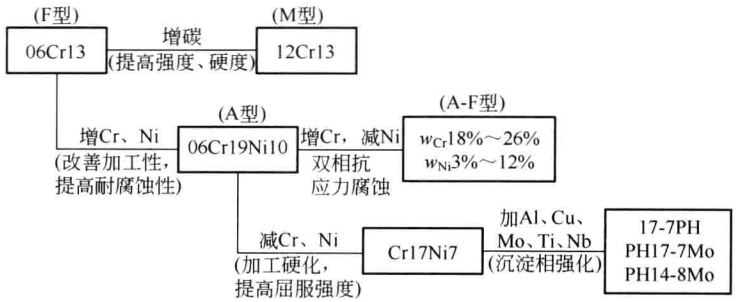


图 1-1 不锈钢类别

(1) 奥氏体型不锈钢

奥氏体型不锈钢在室温下内部显微组织为纯奥氏体组织或奥氏体+少量铁素体组织。形成少量铁素体的目的主要是防止热裂纹的产生，也有利于防止焊缝的晶间腐蚀。

奥氏体型不锈钢以 Cr18Ni9 铁基合金为基础，在此基础上根据不同的用途，发展成图 1-2所示的铬镍奥氏体型不锈钢系列。奥氏体型不锈钢不能利用热处理使晶粒细化，也不能经过淬火来提高其硬度。奥氏体型不锈钢在氧化性环境中具有优良的耐腐蚀性能和良好的耐热性能，是应用最广泛的不锈钢，其中以 18-8 型不锈钢最有代表性，它有较好的力学性能和良好的焊接性，但对溶液中含有氯离子（Cl^-）的介质特别敏感，易发生应力腐蚀。在这类钢中添加钛或铌时，能提高其抗晶间腐蚀能力；添加钼、铜和钛，则能提高其在还原酸

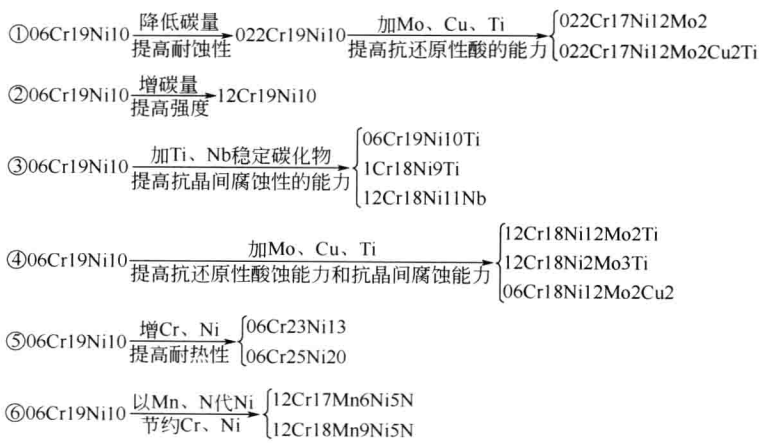


图 1-2 铬镍奥氏体型不锈钢系列

（如稀硫酸）中的耐腐蚀性能，同时也能提高其抗晶间腐蚀的能力。18-8 型不锈钢按其含碳量的不同分为三个等级：一般含碳量（质量分数 $w_C \leqslant 0.15\%$）、低碳级（质量分数 $w_C \leqslant 0.08\%$）和超低碳级（质量分数 $w_C \leqslant 0.03\%$）。

（2）铁素体型不锈钢

室温下它的内部显微组织为铁素体。合金元素以铬为主（铬的质量分数为 11.5%～32.0%），不含镍，某些钢中添加有 Mo、Ti、Al、Si 等成分。一般以退火状态供货。随着铬含量的提高，其耐酸性能也提高，加入钼（Mo）后，则可提高耐酸腐蚀性和抗应力腐蚀的能力。这类不锈钢列入国家标准的牌号有 022Cr12（00Cr12）、10Cr17（1Cr17）、008Cr30Mo2（00Cr30Mo2）等。该类钢用于制造硝酸化工设备的吸收塔、热交换器、储槽和运输硝酸用的槽罐以及制造不承受冲击载荷的其他零部件和设备。

按照碳和氮（C＋N）的总含量，高铬铁素体不锈钢分为普通纯度和超高纯度两个系列[1]。

普通纯度高铬铁素体不锈钢，其碳的质量分数为 0.1%左右并含少量氮，如 10Cr17（1Cr17）、10Cr17Mo（1Cr17Mo）等。它与常用的奥氏体型不锈钢相比，缺点是材质较脆，焊接工艺性较差。这是因为：铁素体晶粒长大后，只有通过压力加工才能细化；在高温下（例如 600～820℃）停留时间长时，$w_{Cr} \geqslant 17\%$的钢会生成脆性的 σ 相（Cr_mFe_n）；在 400～526℃温度区间停留较长时间会出现室温下的脆性，即 475℃脆性。因这类钢脆性较大，所以限制了它的应用。

超低碳和超低氮含量（C＋N 总的质量分数≤0.025%～0.035%）的超高纯度高铬铁素体不锈钢，如 019Cr19Mo2NbTi（00Cr18Mo2）和 008Cr27Mo（00Cr27Mo）等，它们无论在韧性、耐蚀性还是焊接性等方面均优于普通纯度铁素体不锈钢。

（3）马氏体型不锈钢

室温下它的显微组织为马氏体。这类钢中铬的质量分数为 11.5%～18.0%，碳的质量分数最高可达 0.6%。碳含量增高，提高了钢的强度和硬度。在这类钢中加入少量镍可促使生成马氏体，同时又能提高其耐蚀性。

这类钢具有一定的耐腐蚀性和较好的热稳定性以及热强性，可以作为温度在 700℃以下长期工作的耐热钢使用。它被广泛用于制造韧性要求较高的零件，如汽轮机的叶片、内燃机排气阀和医疗器械。这类钢的焊接性较差。常用的马氏体型不锈钢有 12Cr13（1Cr13）、20Cr13（2Cr13）、30Cr13（3Cr13）、14Cr17Ni2（1Cr17Ni2）等。

（4）奥氏体-铁素体型不锈钢

室温下其显微组织为奥氏体加铁素体。通常铁素体的体积分数约占 50%。这类钢是在 18-8 型奥氏体不锈钢的基础上，添加更多的 Cr、Mo、Si 等扩大铁素体元素或降低含碳量而得到的钢种。与含相同碳量的奥氏体不锈钢相比，具有较小的晶间腐蚀倾向和较高的力学性能，且韧性比铁素体型不锈钢好。

该类钢具有抗点腐蚀、抗应力腐蚀性能。双相不锈钢通常以固溶状态供货。常用的牌号有 12Cr21Ni5Ti（1Cr21Ni5Ti）、022Cr19Ni5Mo3Si2N（00Cr18Ni5Mo3Si2）、022Cr23Ni4MoCuN、14Cr18Ni11Si4AlTi（1Cr18Ni11Si4AlTi）、022Cr25Ni6Mo2N、022Cr22Ni5Mo3N、022Cr23Ni5Mo3N。

双相或复相不锈钢的屈服强度约为一般奥氏体不锈钢的 2 倍，耐晶间腐蚀性较好。它已在大化肥厂尿素 CO_2 车间冷却器以及制盐蒸发设备等方面推广使用。这类钢机械加工、冷冲压和焊接性能均良好。

（5）沉淀硬化型不锈钢

这种钢需经过系列的热处理使钢中的碳化物沉淀析出，从而提高材料的强度。这类钢包

括马氏体沉淀硬化型、半奥氏体沉淀硬化型和奥氏体沉淀硬化型三类。其中马氏体沉淀硬化型在固溶处理后，空冷至室温即可得到马氏体＋少量铁素体或马氏体＋少量残余奥氏体的组织，然后经时效强化。而半奥氏体沉淀硬化型经固溶处理并冷却至室温后，得到的是不稳定的奥氏体组织。为了得到马氏体组织，还需经过 M_s 点升高到室温以上的热处理，然后再使之时效强化。奥氏体沉淀硬化型不锈钢则在室温下呈稳定的奥氏体组织，只需经时效强化即可达到目的。05Cr17Ni4Cu4Nb（0Cr17Ni4Cu4Nb）、07Cr17Ni7Al（0Cr17Ni7Al）、07Cr15Ni7Mo2Al（0Cr15Ni7Mo2Al）属于沉淀硬化半奥氏体型不锈钢。该钢的组织特点是在固溶或退火状态时具有奥氏体和体积分数为 5%～20%的铁素体组织。这种钢有很好的成形性能和良好的焊接性。

1.1.2 不锈钢的化学成分

我国至少已制定了 62 项不锈钢材料标准（其中国家标准 38 项，冶金行业标准 16 项，航空航天标准 6 项、机械行业标准 1 项、能源局标准 1 项），每个标准均规定了材料的化学成分、力学性能等技术要求。在机械工程上应用最多的不锈钢材料与标准包括 GB/T 3280—2007《不锈钢冷轧钢板和钢带》（该标准正在修订中）、GB/T 4237—2007《不锈钢热轧钢板和钢带》（不得用于锅炉压力容器制造，该标准正在修订中）和 GB/T 4238—2007《耐热钢钢板和钢带》、GB 24511—2009《承压设备用不锈钢钢板及钢带》、NB/T 47010—2010（JB/T 4728）《承压设备用不锈钢和耐热钢锻件》，常见的不锈钢牌号、化学成分和类别，见表 1-1～表 1-6。

从表 1-1～表 1-6、表 1-8 可以看到，不锈钢和耐热钢相互之间的许多牌号的化学成分、力学性能等是相同的，这些牌号的材料既可作为不锈钢使用，也可作为耐热钢使用。

我国不锈钢钢板和耐热钢钢板的牌号与国外有关国家标准的对照见本章第 1.5 节。

1.2 不锈钢的性能

1.2.1 不锈钢的物理性能[1]

不锈钢和碳钢的物理性能数据对照见表 1-7。从表中可知，碳钢的密度略高于铁素体型和马氏体型不锈钢，而略低于奥氏体型不锈钢；电阻率按碳钢、铁素体型、马氏体型和奥氏体型不锈钢排序依次递增；线胀系数大小的排序也类似，奥氏体型不锈钢最高而碳钢最小；碳钢、铁素体型和马氏体型不锈钢有磁性，奥氏体型不锈钢无磁性，但其冷加工硬化生成马氏体相变时将会产生磁性，可用热处理方法来消除这种马氏体组织而恢复其无磁性。

奥氏体型不锈钢与碳钢相比，具有下列特点。

① 电阻率高，约为碳钢的 5 倍。

② 线胀系数大，比碳钢大 40%左右，随着温度的升高，线胀系数的数值也相应地增加。

③ 热导率低，约为碳钢的 1/3。

由于奥氏体型不锈钢具有这些特殊的物理性能，在焊接过程中会引起较大的焊接变形。特别在异种金属（指与碳钢、低合金钢）焊接时，由于这两种材料的热导率和线胀系数有很大差异，会产生很大的焊接残余应力，也成为焊接接头产生裂纹的主要原因之一。

1.2.2 不锈钢的力学性能[1]

不锈钢冷轧钢和耐热钢在热处理状态的力学性能数据见表 1-8。不锈钢热轧钢板除个别牌号的伸长率和抗拉强度与不锈钢冷轧钢板略有差别外，其余均相同。从表中可以看出，不

表 1-7　不锈钢和碳钢的物理性能[9]

序号	新牌号	旧牌号	密度(20℃)/(kg/dm³)	熔点/℃	比热容(0～100℃)/[kJ/(kg·K)]	热导率/[W/(m·K)]		线胀系数/$10^{-6}K^{-1}$		电阻率(20℃)/(Ω·mm²/m)	纵向弹性模量(20℃)/(kN/mm²)	磁性
						100℃	500℃	0～100℃	0～500℃			
					奥氏体型							
1	12Cr17Mn6Ni5N	1Cr17Mn6Ni5N	7.93	1398～1453	0.50	16.3		15.7		0.69	197	无①
3	12Cr18Mn9Ni5N	1Cr18Mn9Ni5N	7.93			16.3	19.0	14.8	18.7	0.69	197	
4	20Cr13Mn9Ni4	2Cr13Mn9Ni4	7.85		0.49					0.90	202	
9	12Cr17Ni7	1Cr17Ni7	7.93		0.50	16.3	21.5	16.9	18.7	0.73	193	
10	022Cr17Ni7		7.93		0.50	16.3	21.5	16.9	18.7	0.73	193	
11	022Cr17Ni7N		7.93		0.50			16.0	18.0	0.73	200	
12	17Cr18Ni9	2Cr18Ni9	7.85	1398～1453	0.50	18.8	23.5	16.0	18.0	0.73	196	
13	12Cr18Ni9	1Cr18Ni9	7.93	1398～1420	0.50	16.3			18.7	0.73	193	
14	12Cr18Ni9Si3	1Cr18Ni9	7.93	1370～1398	0.50	15.9	21.6	16.2	20.2	0.73	193	
15	Y12Cr18Ni9	Y1Cr18Ni9	7.98	1398～1420	0.50	16.3	21.5	17.3	18.4	0.73	193	
16	Y12Cr18Ni9Se	Y1Cr18Ni9Se	7.93	1398～1420	0.50	16.3	21.5	17.3	18.7	0.73	193	
17	06Cr19Ni10	0Cr19Ni9	7.90	1398～1454	0.50	16.3	21.5	17.2	18.4	0.73	193	
18	022Cr19Ni10	0Cr19Ni10	7.90		0.50	16.3	21.5	16.8	18.3			
19	07Cr19Ni10		7.90		0.50	16.3	21.5	16.8	18.3			无①
20	06Cr18Ni9Cu2	0Cr18Ni9Cu2	8.00		0.50	16.3	21.5	17.3	18.7	0.72	200	
21	06Cr19Ni10N	0Cr19Ni9N	7.93	1398～1454	0.50	16.3	21.5	16.5	18.5	0.72	196	
22	022Cr19Ni10N	00Cr18Ni10N	7.93		0.50	16.3	21.5	16.5	18.5	0.73	200	
23	10Cr18Ni12	1Cr18Ni12	7.93	1398～1453	0.50	16.3	21.5	17.3				
24	06Cr16Ni18	0Cr16Ni18	8.03	1430	0.50	16.2				0.75	193	
25	06Cr21Ni11		8.00	1398～1453	0.50	15.5	21.6	17.3	18.7	0.72	193	
26	22Cr21Ni12N	2Cr21Ni12N	7.73			20.9(24℃)			16.5			
27	16Cr23Ni13	2Cr23Ni13	7.98	1398～1453	0.50	13.8	18.7	14.9	18.0	0.78	200	
28	06Cr23Ni13	0Cr23Ni13	7.98	1398～1453	0.50	15.5	18.6	14.9	18.0	0.78	193	
29	14Cr23Ni18	1Cr23Ni18	7.90	1400～1454	0.50	15.9	18.8	15.4	19.2	1.0	196	
30	20Cr25Ni20	2Cr25Ni20	7.98	1398～1453	0.50	14.2	18.6	15.8	17.5	0.78	200	
31	06Cr25Ni20	0Cr25Ni20	7.98	1397～1453	0.50	16.3	21.5	14.4	17.5	0.78	200	

续表

序号	新牌号	旧牌号	密度(20℃)/(kg/dm³)	熔点/℃	比热容(0～100℃)/[kJ/(kg·K)]	热导率/[W/(m·K)]		线胀系数/$10^{-6}K^{-1}$		电阻率(20℃)/(Ω·mm²/m)	纵向弹性模量(20℃)/(kN/mm²)	磁性
						100℃	500℃	0～100℃	0～500℃			
32	022Cr25Ni22Mo2N		8.02		0.45	12.0		15.8		1.0	200	无①
33	015Cr20Ni18Mo6CuN		8.00	1325～1400	0.50	13.5(20℃)		16.5		0.85	200	
34	06Cr17Ni12Mo2	0Cr17Ni12Mo2	8.00	1370～1397	0.50	16.3	21.5	16.0	18.5	0.74	193	
35	022Cr17Ni12Mo2	00Cr17Ni14Mo2	8.00		0.50	16.3	21.5	16.0	18.5	0.74	193	
36	06Cr17Ni12Mo2Ti	0Cr18Ni12Mo3Ti	7.90		0.50	16.0	24.0	15.7	17.6	0.75	199	
37	06Cr17Ni12Mo2N	0Cr17Ni12Mo2N	8.00		0.50	16.3	21.5	16.5	18.0	0.73	200	
38	022Cr17Ni12Mo2N	00Cr17Ni13Mo2N	8.01		0.47	16.5		15.0			200	
39	06Cr18Ni12Mo2Cu2	0Cr18Ni12Mo2Cu2	7.96		0.50	16.1	21.7			0.74	186	
40	022Cr18Ni14Mo2Cu2	00Cr18Ni14Mo2Cu2	7.96		0.50	16.1	21.7	16.0		0.74	191	
41	015Cr21Ni26Mo5Cu2		8.00			13.7		15.0			188	
42	06Cr19Ni13Mo3	0Cr19Ni13Mo3	8.00	1370～1397	0.50	16.3	21.5	16.0	18.5	0.74	193	
43	022Cr19Ni13Mo3	00Cr19Ni13Mo3	7.93	1375～1400	0.50	14.4	21.5	16.5		0.79	200	
44	022Cr19Ni16Mo5N		8.00		0.50	12.8		15.2				无①
45	06Cr19Ni11Ti	0Cr18Ni11Ti	8.03	1398～1427	0.50	16.3	22.2	16.6	18.6	0.72	193	
46	45Cr14Ni14W2Mo	4Cr14Ni14W2Mo	8.00		0.51	15.9	22.2	16.6	18.0	0.81	177	
47	24Cr18Ni8W2	2Cr18Ni8W2	7.98		0.50	15.9	23.0	19.5	25.1			
48	12Cr16Ni35	1Cr16Ni35	8.00	1318～1427	0.46	12.6	19.7	16.6		1.02	196	
49	06Cr18Ni11Nb	0Cr18Ni11Nb	8.03	1398～1427	0.50	16.3	22.2	16.6	18.6	0.73	193	
50	06Cr18Ni13Si4	0Cr18Ni13Si4	7.75	1400～1430	0.50	16.3		13.8				
51	16Cr20Ni14Si2	1Cr20Ni14Si2	7.90		0.50	15.0		16.5		0.85		

续表

序号	新牌号	旧牌号	密度(20℃)/(kg/dm³)	熔点/℃	比热容(0～100℃)/[kJ/(kg·K)]	热导率/[W/(m·K)]		线胀系数/$10^{-6}K^{-1}$		电阻率(20℃)/(Ω·mm²/m)	纵向弹性模量(20℃)/(kN/mm²)	磁性
						100℃	500℃	0～100℃	0～500℃			
奥氏体-铁素体型												
52	14Cr18Ni11Si4AlTi	1Cr18Ni11Si4AlTi	7.51		0.48	13.0	19.0	16.3	19.7	1.04	180	有
53	022Cr19Ni5Mo3Si2N	00Cr18Ni5Mo3Si2	7.70		0.46	20.0	24.0(300℃)	12.2	13.5(300℃)		196	
54	12Cr21Ni5Ti	1Cr21Ni5Ti	7.80			17.6	23.0	10.0	17.4	0.79	187	
55	022Cr22Ni5Mo3N		7.80	1420～1462	0.4	19.0	23.0(300℃)	13.7	14.7(300℃)	0.88	186	
56	022Cr23Ni14MoCuN		7.80		0.50	16.0		13.0			200	有
57	022Cr25Ni6Mo2N		7.80		0.50	21.0	13.4(200℃)	24.0(300℃)			196	
58	022Cr25Ni7Mo3WCuN		7.80		0.50		25.0	11.5(200℃)	12.7(400℃)	0.75	228	
59	03Cr25Ni6Mo3Cu2N		7.80		0.46	13.5		12.3			210	
60	022Cr25Ni7Mo4N		7.80			14		12.0			185(200℃)	
铁素体型												
61	06Cr13Al	0Cr13Al	7.75	1480～1530	0.46	24.2		10.8		0.60	200	有
62	06Cr11Ti	0Cr11Ti	7.75		0.46	25.0		10.6	12.0	0.60		
63	022Cr12	00Cr12	7.75		0.46	24.9	28.5	10.6	12.0	0.57	201	
64	022Cr11Ti		7.75		0.46	24.9	28.5	10.6	12.0	0.57	201	
65	10Cr15	1Cr15	7.70		0.46	26.0		10.3	11.9	0.59	200	
66	10Cr17	1Cr17	7.70	1480～1508	0.46	26.0		10.5	11.9	0.60	200	
67	10Cr17	Y1Cr17	7.78	1427～1510	0.46	26.0		10.4	11.4	0.60	200	
68	022Cr18Ti	00Cr18	7.70		0.46	35.1(20℃)		10.4		0.60	200	有
69	10Cr17Mo	1Cr17Mo	7.70		0.46	26.0		11.7		0.60	200	
70	10Cr17MoNb		7.70		0.44	30.0		11.7		0.70	220	
71	019Cr18MoTi		7.70		0.46	35.1		10.4		0.60	200	
72	019Cr19Mo2NbTi	00Cr18Mo2	7.75		0.46	36.9		10.6(200℃)		0.60	200	
73	008Cr27Mo	00Cr27Mo	7.67		0.46	26.0		11.0		0.64	206	
74	008Cr30Mo2	00Cr30Mo2	7.64		0.50	26.0		11.0		0.64	210	

续表

序号	新牌号	旧牌号	密度(20℃)/(kg/dm³)	熔点/℃	比热容(0～100℃)/[kJ/(kg·K)]	热导率/[W/(m·K)]		线胀系数/$10^{-6}K^{-1}$		电阻率(20℃)/(Ω·mm²/m)	纵向弹性模量(20℃)/(kN/mm²)	磁性
						100℃	500℃	0～100℃	0～500℃			
马氏体型												
75	12Cr12	1Cr12	7.80	1480～1530	0.46	24.2		9.9	11.7	0.57	200	
76	06Cr13	0Cr13	7.75		0.46	25.0		10.6	12.0	0.60	220	
77	12Cr13	1Cr13	7.70	1480～1530	0.46	24.2	28.9	11.0	11.7	0.57	200	有
78	04Cr13Ni5Mo		7.79		0.47	16.30		10.7			201	
79	12Cr12	1Cr12	7.80	1480～1530	0.46	24.2		9.9	11.7	0.57	200	
80	06Cr13	0Cr13	7.75		0.46	25.0		10.6	12.0	0.60	220	
81	12Cr13	1Cr13	7.70	1480～1530	0.46	24.2	28.9	11.0	11.7	0.57	200	
82	04Cr13Ni5Mo		7.79		0.47	16.30		10.7			201	
83	Y12Cr13	YCr13	7.78	1482～1532	0.46	25.0		9.9	11.5	0.57	200	
84	20Cr13	2Cr13	7.75	1470～1510	0.46	22.2	26.4	10.3	12.2	0.55	200	
85	30Cr13	3Cr13	7.76	1365	0.47	25.1	25.5	10.5	12.0	0.52	219	
86	Y30Cr13	Y3Cr13	7.78	1454～1510	0.46	25.1		10.3	11.7	0.57	219	有
87	40Cr13	4Cr13	7.75		0.46	28.1	28.9	10.5	12.0	0.50	215	
88	14Cr17Ni2	1Cr17Ni2	7.75		0.46	20.2	25.1	10.3	12.4	0.72	193	
89	17Cr16Ni2		7.71		0.46	27.8	31.8	10.0	11.0	0.70	212	
90	68Cr17	7Cr17	7.78	1371～1508	0.46	21.2		10.2	11.7	0.60	200	
91	85Cr17	8Cr17	7.78	1371～1508	0.46	24.2		10.2	11.9	0.60	200	
92	108Cr17	11Cr17	7.78	1371～1482	0.46	24.0		10.2	11.7	0.60	200	
93	Y108Cr17	Y11Cr17	7.78	1371～1482	0.46	24.2		10.1		0.60	200	

刘政军　徐德昆　等编著

不锈钢焊接及质量控制

The Second Edition
第二版

BUXIUGANG HANJIE
JI ZHILIANG KONGZHI

化学工业出版社

表 1-8　不锈钢冷轧钢和耐热钢在热处理状态的力学性能[2~5]

类别	牌号	热处理	拉伸试验				冲击试验	硬度试验			标准代号
			$R_{p0.2}$/MPa	R_m/MPa	A/%	Z/%	A_{kU2}/J	HBW	HRB	HV	
			不小于					不大于			
奥氏体型	12Cr17Mn6Ni5N (1Cr17Mn6Ni5N)	1010～1120℃快冷	275	520	40	45	—	241	100	253	①
	12Cr18Mn9Ni5N (1Cr18Mn8Ni5N)	1010～1120℃快冷	275	520	40	45	—	207	95	218	①
	12Cr17Ni7 (1Cr17Ni7)	1010～1150℃快冷	205	520	40	60	—	187	90	200	①
		≥1040℃水冷或其他方式快冷	205	515	40	—	—	217	95	218	②、③
	022Cr17Ni7	≥1040℃水冷或其他方式快冷	220	550	45	—	—	241	100	—	②、③
	022Cr17Ni7N	≥1040℃水冷或其他方式快冷	240	550	45	—	—	241	100	—	②、③
	12Cr18Ni9 (1Cr18Ni9)	1010～1150℃快冷	205	520	40	60	—	187	90	200	①
		≥1040℃水冷或其他方式快冷	205	515	40	—	—	201	92	210	②、③、④
	05Cr19Ni10Si2N	≥1040℃水冷或其他方式快冷	290	600	40	—	—	217	95	—	②、③
	Y12Cr18Ni9 (Y1Cr18Ni9)	1010～1150℃快冷	205	520	40	50	—	187	90	200	①
	Y12Cr18Ni9Se (Y1Cr18Ni9Se)	1010～1150℃快冷	205	520	40	50	—	187	90	200	①
	12Cr18Ni9Si3 (1Cr18Ni9Si3)	≥1040℃水冷或其他方式快冷	205	515	40	—	—	217	95	220	②、③、④
	06Cr19Ni10 (0Cr18Ni9)	1010～1150℃快冷	205	520	40	60	—	187	90	200	①
		≥1040℃水冷或其他方式快冷	205	515	40	—	—	201	92	210	②、③、④
	022Cr19Ni10 (00Cr19Ni10)	1010～1150℃快冷	175	480	40	60	—	187	90	200	①
		≥1040℃水冷或其他方式快冷	170	485	40	—	—	201	90	210	②、③
	07Cr19Ni10	≥1040℃水冷或其他方式快冷	205	515	40	—	—	201	92	210	②、④
		≥1095℃水冷或其他方式快冷	205	515	40	—	—	201	92	210	③
	06Cr18Ni9Cu3 (0Cr18Ni9Cu3)	1010～1150℃快冷	175	480	40	60	—	187	90	200	①
	06Cr19Ni10N (0Cr19Ni9N)	1010～1150℃快冷	275	550	35	50	—	217	95	220	①
		≥1040℃水冷或其他方式快冷	240	550	30	—	—	201	92	220	②、③
	06Cr19Ni10NbN (0Cr19Ni10NbN)	1010～1150℃快冷	345	685	35	50	—	250	100	260	①
		≥1040℃水冷或其他方式快冷	345	685	35	—	—	250	100	260	②、③

续表

类别	牌号	热处理	拉伸试验				冲击试验	硬度试验			标准代号
			$R_{p0.2}$/MPa	R_m/MPa	A/%	Z/%	A_{kU2}/J	HBW	HRB	HV	
			不小于					不大于			
奥氏体型	022Cr19Ni10N	1010～1150℃快冷	245	550	40	50	—	217	95	220	①
	(00Cr18Ni10N)	≥1040℃水冷或其他方式快冷	205	515	40	—	—	201	92	220	②、③
	10Cr18Ni12 (1Cr18Ni12)	1010～1150℃快冷	175	480	40	60	—	187	90	200	①
		≥1040℃水冷或其他方式快冷	170	485	40	—	—	183	88	200	②、③
	06Cr20Ni11	≥1040℃水冷或其他方式快冷	205	515	40	—	—	183	88	—	④
	16Cr23Ni13 (2Cr23Ni13)	≥1040℃水冷或其他方式快冷	205	515	40	—	—	217	95	220	④
	06Cr23Ni13 0Cr23Ni13	1030～1150℃快冷	205	520	40	60	—	187	90	200	①
		≥1040℃水冷或其他方式快冷	205	515	40	—	—	217	95	220	②、③、④
	20Cr25Ni20 (2Cr25Ni20)	≥1400℃水冷或其他方式快冷	205	515	40	—	—	217	95	220	④
	06Cr25Ni20 (0Cr25Ni20)	1030～1180℃快冷	205	520	40	50	—	187	90	200	①
		≥1400℃水冷或其他方式快冷	205	515	40	—	—	217	95	220	②、③、④
	022Cr25Ni22Mo2N	≥1400℃水冷或其他方式快冷	270	580	25	—	—	217	95	—	②、③
	06Cr17Ni12Mo2 (0Cr17Ni12Mo2)	1010～1150℃快冷	205	520	40	60	—	187	90	200	①
		≥1400℃水冷或其他方式快冷	205	515	40	—	—	217	95	220	②、③、④
	06Cr17Ni12Mo2N (0Cr17Ni12Mo2N)	1010～1150℃快冷	275	550	35	50	—	217	95	200	①
		≥1400℃水冷或其他方式快冷	240	550	35	—	—	217	95	220	②、③
	022Cr17Ni12Mo2N (00Cr17Ni13Mo2N)	1010～1150℃快冷	245	550	40	50	—	217	95	220	①
		≥1400℃水冷或其他方式快冷	205	515	40	—	—	217	95	220	②、③

续表

类别	牌号	热处理	拉伸试验				冲击试验	硬度试验			标准代号
			$R_{p0.2}$/MPa	R_m/MPa	A/%	Z/%	A_{kU2}/J	HBW	HRB	HV	
			不小于					不大于			
奥氏体型	022Cr17Ni12Mo2 (00Cr17Ni14Mo2)	1010～1150℃快冷	175	480	40	60	—	187	90	200	①
		≥1400℃水冷或其他方式快冷	170	485	40	—	—	217	95	220	②、③
	06Cr17Ni12Mo2Ti (0Cr18Ni12Mo3Ti)	1000～1100℃快冷	205	530	40	55	—	187	90	200	①
		≥1400℃水冷或其他方式快冷	205	515	40	—	—	217	95	220	②、③
	06Cr17Ni12Mo2Nb	≥1400℃水冷或其他方式快冷	205	515	30	—	—	217	95	—	②、③
	06Cr18Ni12Mo2Cu2 (0Cr18Ni12Mo2Cu2)	1010～1150℃快冷	205	520	40	60	—	187	90	200	①
		1010～1150℃水冷 或其他方式快冷	205	520	40	—	—	187	90	200	②、③
	015Cr21Ni26Mo5Cu2		220	490	35	—	—	90	—	—	②、③
	022Cr18Ni14Mo2Cu2 (00Cr18Ni14Mo2Cu2	1050～1150℃,快冷	175	480	40	60	—	187	90	200	①
	06Cr19Ni13Mo3 (0Cr19Ni13Mo3)	1050～1150℃快冷	205	520	40	60	—	187	90	200	①
		≥1400℃水冷或其他方式快冷	205	515	35	—	—	217	95	220	②、③、④
	022Cr19Ni13Mo3 (00Cr19Ni13Mo3)	1050～1150℃快冷	175	480	40	60	—	187	90	200	①
		≥1400℃水冷或其他方式快冷	205	515	40	—	—	217	95	220	②、③
	022Cr19Ni16Mo5N	≥1400℃水冷或其他方式快冷	240	550	40	—	—	223	96	—	②、③

续表

类别	牌号	热处理	拉伸试验				冲击试验	硬度试验			标准代号
			$R_{p0.2}$/MPa	R_m/MPa	A/%	Z/%	A_{kU2}/J	HBW	HRB	HV	
			不小于					不大于			
奥氏体型	03Cr18Ni16Mo5 (0Cr18Ni16Mo5)	1030～1180℃,快冷	175	480	40	45	—	187	90	200	①
	022Cr19Ni13Mo4N	≥1400℃水冷或其他方式快冷	240	550	40	—	—	217	95	—	②、③
	06Cr18Ni11Ti (0Cr18Ni10Ti)	920～1150℃,快冷	205	520	40	50	—	187	90	200	①
		≥1400℃水冷或其他方式快冷	205	515	40	—	—	217	95	220	②、③
		≥1095℃水冷或其他方式快冷	205	515	40	—	—	217	95	220	④
	015Cr24Ni22- Mo8Mn3CuN	≥1150℃水冷或其他方式快冷	430	750	40	—	—	250	—	—	②、③
	12Cr16Ni35 (1Cr15Ni35)	1030～1180℃,快冷	205	560	—	—	—	201	95	210	④
	022Cr24Ni17- Mo5Mn6NbN	1120～1170℃,水冷或 其他方式快冷	415	795	35	—	—	241	100	—	②、③
	06Cr18Ni11Nb (0Cr18Ni11Nb)	980～1150℃快冷	205	520	40	50	—	187	90	200	①
		≥1400℃水冷或其他方式快冷	205	515	40	—	—	201	92	210	②、③、④
	06Cr18Ni13Si4 (0Cr18Ni13Si4)	1010～1150℃快冷	205	520	40	60	—	207	95	218	①
	16Cr25Ni20Si2 (1Cr25Ni20Si2)	1080～1130℃快冷	—	540	35	—	—	—	—	—	④

续表

类别	牌号	热处理	拉伸试验				冲击试验	硬度试验			标准代号
			$R_{p0.2}$/MPa	R_m/MPa	A/%	Z/%	A_{kU2}/J	HBW	HRB	HV	
			不小于					不大于			
奥氏体-铁素体型	14Cr18Ni11Si4AlTi (1Cr18Ni11Si4AlTi)	930～1150℃快冷	440	715	25	40	63	—	—	—	①
		950～1050℃，水冷或其他方式快冷	—	715	25	—	—	—	—	—	②、③
	022Cr19Ni5Mo3Si2N (00Cr18Ni5Mo3Si2)	920～1150℃，快冷	390	590	20	40	—	290	30	300	①
		950～1050℃，水冷	440	630	25	—	—	290	31HRC	—	②
		950～1050℃，水冷或其他方式快冷	440	630	25	—	—	290	31HRC	—	③
	12Cr21Ni5Ti (1Cr21Ni5Ti)	950～1050℃，水冷或其他方式快冷	—	635	20	—	—	—	—	—	②
			350	635	20	—	—	—	—	—	③
	022Cr22Ni5Mo3N	950～1200℃，快冷	450	620	25	—	—	290	—	—	①
		1040～1100℃，水冷或其他方式快冷	450	620	25	—	—	293	31HRC	—	②、③
	022Cr23Ni4MoCuN	950～1050℃，水冷或其他方式快冷	400	600	25			290	31HRC	—	②、③
	022Cr23Ni5Mo3N	950～1200℃，快冷	450	650	25	—	—	290	—	—	①
		1040～1100℃，水冷或类似方法快冷	450	620	25	—	—	293	31HRC	—	②、③
	022Cr25Ni6Mo2N	950～1200℃，快冷	450	620	20	—	—	260	—	—	①
		1025～1125℃，水冷或其他方式快冷	450	640	25	—	—	295	31HRC	—	②
		1050～1100℃水冷	450	640	25	—	—	295	30HRC	—	③

续表

类别	牌号	热处理	拉伸试验				冲击试验	硬度试验			标准代号
			$R_{p0.2}$/MPa	R_m/MPa	A/%	Z/%	A_{kU2}/J	HBW	HRB	HV	
			不小于					不大于			
奥氏体-铁素体型	022Cr25Ni-7Mo4WCuN	920～1150℃，水冷或其他方式快冷	550	750	25	—	—	270	—	—	②、③
	03Cr25Ni-6Mo3Cu2N	1000～1200℃，快冷	550	750	25	—	—	290	—	—	①
		1050～1100℃，水冷或其他方式快冷	550	760	15	—	—	302	32HRC	—	②
	022Cr25Ni7Mo4N	1050～1100℃，水冷或其他方式快冷	550	795	15	—	—	310	32HRC	—	③
		1025～1125℃，水冷或其他方式快冷	550	795	15	—	—	310	32HRC	—	②、③
铁素体型	06Cr13Al(0Cr13Al)	780～830℃，空冷或缓冷	175	410	20	60	78	183	—	—	①
		780～830℃，快冷或缓冷	170	415	20	—	—	179	88	200	②、③、④
	022Cr11Ti	800～900℃，快冷或缓冷	275	415	20	—	—	197	92	200	②、③、④
	022Cr11NbTi	800～900℃，快冷或缓冷	275	415	20	—	—	197	92	200	②、③、④
	022Cr12(00Cr12)	700～820℃，空冷或缓冷	195	360	22	60	—	183	—	—	①
		700～820℃，快冷或缓冷	195	360	22	—	—	183	88	200	②、③
	022Cr12Ni	700～820℃，快冷或缓冷	280	450	18	—	—	180	88	—	②、③
	10Cr15(1Cr15)	780～850℃快冷或缓冷	205	450	22	—	—	183	89	200	②、③
	10Cr17(1Cr17)	780～850℃空冷或缓冷	205	450	22	50	—	183	—	—	①
		780～850℃空冷	205	450	22	—	—	183	89	200	②、③、④

续表

类别	牌号	热处理	拉伸试验				冲击试验	硬度试验			标准代号
			$R_{p0.2}$/MPa	R_m/MPa	A/%	Z/%	A_{kU2}/J	HBW	HRB	HV	
			不小于					不大于			
铁素体型	10Cr17(1Cr17)	780～850℃空冷或缓冷	205	450	22	—	—	183	89	200	③、④
	Y10Cr17(Y1Cr17)	680～820℃空冷或缓冷	205	450	22	50	—	183	—	—	①
	022Cr18Ti (00Cr17)	780～950℃快冷或缓冷	175	360	22	—	—	183	88	200	②
		700～800℃快冷	175	360	22	—	—	183	88	200	③
	10Cr17Mo (1Cr17Mo)	780～850℃空冷或缓冷	205	450	22	60	—	183	—	—	①
		780～850℃快冷或缓冷	240	450	22	—	—	183	89	200	②、③
	019Cr18MoTi	—	245	410	20	—	—	217	96	230	②
		780～950℃快冷或缓冷	245	410	20	—	—	217	96	230	③
	022Cr18NbTi	—	250	430	18	—	—	180	88	—	②、③
	019Cr19Mo2NbTi (00Cr18Mo2)	800～1050℃，快冷	275	415	20	—	—	217	96	230	②、③
	008Cr30Mo2 (00Cr30Mo2)	900～1050℃，快冷	295	450	20	45	—	228	—	—	①
		800～1050℃，快冷	295	450	22	—	—	209	95	220	②、③
	16Cr25N(16Cr25N)	700～880℃，快冷	275	510	20	—	—	201	95	210	④
	008Cr27Mo (00Cr27Mo)	900～1050℃，快冷	245	410	20	45	—	219	—	—	①
			245	410	22	—	—	190	90	200	②、③
马氏体型	12Cr12(1Cr12)	见表 1-16	390	590	25	55	118	170 退火后 200	—	—	①
		见表 1-17	205	485	20	—	—	217	96	210	②、③
		见表 1-17	205	485	25	—	—	217	88	210	④
	06Cr13(0Cr13)	见表 1-16	345	490	24	60	—	退火后 183	—	—	①
		见表 1-17	205	415	20	—	—	183	89	200	②、③

续表

类别	牌号	热处理	拉伸试验				冲击试验	硬度试验			标准代号
			$R_{p0.2}$/MPa	R_m/MPa	A/%	Z/%	A_{kU2}/J	HBW	HRB	HV	
			不小于					不大于			
马氏体型	12Cr13(1Cr13)	见表 1-16	345	540	22	55	78	159 退火后 200	—	—	①
		见表 1-17	205	450	20	—	—	217	96	210	②、③
			—	690	15	—	—	217	96	210	④
	04Cr13Ni5Mo	见表 1-17	620	795	15	—	—	302	32HRC	—	②、③
	Y12Cr13(Y1Cr13)	见表 1-16	345	540	17	45	55	159 退火后 200	—	—	①
	13Cr13Mo(1Cr13Mo)	见表 1-16	490	690	20	60	78	192 退火后 200	—	—	①
	20Cr13(2Cr13)	见表 1-16	440	640	20	50	63	192 退火后 223	—	—	①
		见表 1-17	225	520	18	—	—	223	97	234	②、③
	30Cr13(3Cr13)	见表 1-16	540	735	12	40	24	217 退火后 235	—	—	①
		见表 1-17	225	540	18	—	—	235	99	247	②、③
	Y30Cr13(Y3Cr13)	见表 1-16	540	735	8	35	24	217 退火后 235	—	—	①
	32Cr13Mo (3Cr13Mo)	见表 1-16	—	—	—	—	—	退火后 207	50HRC	—	①
	40Cr13(4Cr13)	见表 1-16	—	—	—	—	—	退火后 235	50HRC	—	①
		见表 1-17	225	590	15	—	—	—	—	—	②、③
	14Cr17Ni2 (1Cr17Ni2)	见表 1-16	—	1080	10	—	39	退火后 285	—	—	①

续表

类别	牌号	热处理	拉伸试验				冲击试验	硬度试验			标准代号
			$R_{p0.2}$/MPa	R_m/MPa	A/%	Z/%	A_{kU2}/J	HBW	HRB	HV	
			不小于					不大于			
马氏体型	17Cr16Ni2	见表 1-16	700	900～1050	12	45	25(A_{kV})	退火后 295	—	—	①
		见表 1-16	600	800～950	14	45	25(A_{kV})	退火后 295	—	—	①
		见表 1-17	690	880～1080	12	—	—	262～326	—	—	②
		见表 1-17	1050	1350	10	—	—	388	—	—	②、③
	68Cr17(7Cr17)	见表 1-16	—	—	—	—	—	退火后 255	54HRC	—	①
		见表 1-17	245	590	15	—	—	255	25HRC	269	②、③
	22Cr12NiMoWV (2Cr12NiMoWV)	见表 1-17	275	510	20	—	—	200	95	210	④

类别	牌号	热处理		厚度/mm	拉伸试验				硬度试验		标准代号
		类型	热处理工艺参数		$R_{p0.2}$/MPa	R_m/MPa	A/%	Z/%	HBW	HRC	
					不小于				不大于		
沉淀硬化型	04Cr13Ni8Mo2Al	固溶处理	见表 1-19	≥0.10～<8.0	—	—	—	—	363	38	②
		沉淀硬化	510℃±6℃ 详见表 1-19	≥0.10～<0.50	1410	1515	6	—	—	45	②
				≥0.50～<5.0	1410	1515	8	—	—	45	
				≥5.0～≤8.0	1410	1515	8	—	—	45	②
			538℃±6℃ 详见表 1-19	≥0.10～<0.50	1310	1380	6	—	—	43	
				≥0.50～<5.0	1310	1380	8	—	—	43	
				≥5.0～≤8.0	1310	1380	10	—	—	43	
		固溶处理	见表 1-19	≥2～≤102	—	—	—	—	363	38	③
		沉淀硬化	510℃±5℃ 详见表 1-19	≥2～<5	1410	1515	8	—	—	45	③
				≥5～<16	1410	1515	10	—	—	45	
				≥16～≤100	1410	1515	10	—	429	45	
			540℃±5℃ 详见表 1-19	≥2～<5	1310	1380	8	—	—	43	③
				≥5～<16	1310	1380	10	—	—	43	
				≥16～≤100	1310	1380	10	—	401	43	

续表

类别	牌号	热处理			厚度/mm	拉伸试验				硬度试验		标准代号
		类型	热处理工艺参数			$R_{p0.2}$/MPa	R_m/MPa	A/%	Z/%	HBW	HRC	
						不小于				不大于		
沉淀硬化型	022Cr12Ni9Cu2NbTi	固溶处理	见表 1-19		≥0.30～≤8.0	1105	1205	3		331	36	②
		沉淀硬化	510℃±6℃或482℃±6℃详见表 1-19		≥0.10～<0.50	1410	1525	—			44	②
					≥0.50～<1.5	1410	1525	3			44	
					≥1.50～≤8.0	1410	1525	4			44	
		固溶处理	见表 1-19		≥2～≤102	1105	1205	3		331	36	③
		沉淀硬化	486℃±6℃或510℃±5℃详见表 1-19		≥2	1410	1525	4			43	③
	022Cr12Ni9Cu2NbTi	固溶处理	见表 1-19		≥0.30～≤100	1105	1205	≥3	—	≤331	≤36	
		沉淀硬化	510℃±10℃或480℃±6℃详见表 1-19		≥0.10～<0.75	1410	1525	—	—	—	≥44	④
					≥0.75～<1.50	1410	1525	3	—	—	≥44	④
					≥1.50～<16	1410	1525	4	—	—	≥44	④
	05Cr15Ni5Cu4Nb	固溶处理	见表 1-18			—	—	—	—	≤363	≤38	④
		沉淀硬化	480℃时效	详见表 1-18		1180	1310	10	35	≥375	≥40	①
			550℃时效			1000	1071	12	45	≥331	≥35	①
			580℃时效			865	1000	13	45	≥302	≥31	
			620℃时效			725	930	16	50	≥277	≥28	
	07Cr17Ni7Al (0Cr17Ni7Al)	固溶处理	见表 1-18			≤380	≤1030	20	—	≤229	—	①
		沉淀硬化	510℃时效详见表 1-18			1030	1230	4	10	≥388	—	
			565℃时效详见表 1-18			960	1140	5	25	≥363	—	

续表

类别	牌号	热处理			厚度/mm	拉伸试验				硬度试验		标准代号
		类型	热处理工艺参数			$R_{p0.2}$/MPa	R_m/MPa	A/%	Z/%	HBW	HRC	
						不小于				不大于		
沉淀硬化型	07Cr17Ni7Al (0Cr17Ni7Al)	固溶处理	见表 1-19		≥0.10～<0.30	450	1035	—	—	—	—	②
					≥0.30～≤8.0	380	1035	20	—	—	92HRB	
		沉淀硬化	760℃±15℃	详见表 1-19	≥0.10～<0.30	1035	1240	3			38	②
			15℃±3℃		≥0.30～<5.0	1035	1240	5			38	
			566℃±6℃		≥5.0～≤8.0	965	1170	7		352	43	
			954℃±8℃		≥0.10～<0.30	1310	1450	1			44	
			−73℃±6℃		≥0.30～<5.0	1310	1450	3			44	
			510℃±6℃		≥5.0～≤8.0	1240	1380	6		401	43	
	07Cr17Ni7Al (0Cr17Ni7Al)	固溶处理	见表 1-19		≥2～≤102	380	1035	20	—	—	92HRB	③
		沉淀硬化	760℃±15℃ 15℃±3℃ 566℃±6℃	详见表 1-19	≥2～<5	1035	1240	6	—	38	—	
					≥5～≤16	965	1170	7	—	38	352	
	07Cr17Ni7Al (0Cr17Ni7Al)	沉淀硬化	954℃±8℃ −73℃±6℃ 510℃±6℃	详见表 1-19	≥2～<5	1310	1450	4	—	44	—	③
					≥5～≤16	1240	1380	6	—	43	401	
	07Cr17Ni7Al (0Cr17Ni7Al)	固溶处理	见表 1-19		≥0.1～<0.3	≤450	≤1035		—	—	—	④
			见表 1-19		≥0.3～≤100	≤380	≤1035	≥20	—	—	92HRB	④
		沉淀硬化	760℃±15℃ 15℃±3℃ 566℃±6℃ 详见表 1-19		≥0.05～<0.30	1035	1240	3	—		≥38	④
					≥0.30～<5.0	1035	1240	5	—		≥38	④
					≥5.0～≤16	965	1170	7	—	≥352	≥38	④
			954℃±8℃ −73℃±6℃ 510℃±6℃ 详见表 1-19		≥0.05～<0.30	1310	1450	1	—	—	≥44	④
					≥0.30～<5.0	1310	1450	3	—	—	≥44	④
					≥5.0～≤16	1240	1380	6	—	≥401	≥43	④
	05Cr17Ni4Cu4Nb (0Cr17Ni4Cu4Nb)	固溶处理	详见表 1-18		—	—	—	—	≤363	≤38		①
		沉淀硬化	480℃时效	详见表 1-18		1180	1310	10	40	≥375	≥40	①
			550℃时效			1000	1070	12	45	≥331	≥35	①
			580℃时效			860	1000	13	45	≥302	≥31	①
			620℃时效			725	930	16	50	≥277	≥28	①

续表

类别	牌号	热处理		厚度/mm	拉伸试验				硬度试验		标准代号
		类型	热处理工艺参数		$R_{p0.2}$/MPa	R_m/MPa	A/%	Z/%	HBW	HRC	
					不小于				不大于		
沉淀硬化型	05Cr17Ni4Cu4Nb (0Cr17Ni4Cu4Nb)	固溶处理		≥0.4～<100	≤1105	≤1255	≤3	—	≤363	≤38	④
		沉淀硬化	480℃±10℃ 详见表 1-19	≥0.1～<5.0	1170	1310	5	—	—	40～48	④
				≥5.0～<16	1170	1310	8	—	388～477	40～48	④
				≥16～≤100	1170	1310	10	—	388～477	40～48	④
			496℃±10℃ 详见表 1-19	≥0.1～<5.0	1070	1170	5	—	—	38～46	④
				≥5.0～<16	1070	1170	8	—	375～477	38～47	④
				≥16～≤100	1070	1170	10	—	375～477	38～47	④
			552℃±10℃ 详见表 1-19	≥0.1～<5.0	1000	1070	5	—	—	35～43	④
				≥5.0～<16	1000	1070	8	—	321～415	33～42	④
				≥16～≤100	1000	1070	10	—	321～415	33～42	④
			579℃±10℃ 详见表 1-19	≥0.1～<5.0	860	1000	5	—	—	31～40	④
				≥5.0～<16	860	1000	9	—	293～375	29～38	④
				≥16～≤100	860	1000	13	—	293～375	29～38	④
	05Cr17Ni4Cu4Nb (0Cr17Ni4Cu4Nb)	沉淀硬化	593℃±10℃ 详见表 1-19	≥0.1～<5.0	790	965	5	—	—	31～40	④
				≥5.0～<16	790	965	10	—	293～375	29～38	④
				≥16～≤100	790	965	14	—	293～375	29～38	④
			621℃±10℃ 详见表 1-19	≥0.1～<5.0	725	930	8	—	—	28～38	④
				≥5.0～<16	725	930	10	—	269～352	26～36	④
				≥16～≤100	725	930	16	—	269～352	26～36	④
			760℃±10℃ 621℃±10℃ 详见表 1-19	≥0.1～<5.0	515	790	9	—	255～331	26～36	④
				≥5.0～<16	515	790	11	—	248～321	24～34	④
				≥16～≤100	515	790	18	—	248～321	24～34	④
	07Cr15Ni7Mo2Al (0Cr15Ni7Mo2Al)	固溶处理	见表 1-18		—	—	—	—	≤269	—	①
		沉淀硬化	510℃时效 详见表 1-18		1210	1320	6	20	≥388	—	
			565℃时效 详见表 1-18		1100	1210	7	25	≥375	—	

续表

类别	牌号	热处理			厚度/mm	拉伸试验				硬度试验		标准代号
		类型	热处理工艺参数			$R_{p0.2}$/MPa	R_m/MPa	A/%	Z/%	HBW	HRC	
						不小于				不大于		
沉淀硬化型	07Cr15Ni7Mo2Al (0Cr15Ni7Mo2Al)	固溶处理	见表 1-19		≥0.10～<8.0	450	1035	25	—	—	100HRB	②
		沉淀硬化	760℃±15℃ 15℃±3℃ 566℃±6℃	详见表 1-19	≥0.10～<0.30	1170	1310	3	—	—	40	
					≥0.30～<5.0	1170	1310	5	—	—	40	
					≥5.0～≤8.0	1170	1310	4	—	375	40	
			954℃±8℃ −73℃±6℃ 510℃±6℃		≥0.10～<0.30	1380	1550	2	—	—	46	
					≥0.30～<5.0	1380	1550	4	—	—	46	
					≥5.0～≤8.0	1380	1550	4	—	429	45	
	07Cr15Ni7Mo2Al (0Cr15Ni7Mo2Al)	固溶处理	见表 1-19		≥2～≤102	450	1035	25	—	—	100HRB	③
		沉淀硬化	760℃±15℃ 15℃±3℃ 566℃±6℃	详见表 1-19	≥2～<5	1170	1310	5	—	—	40	③
					≥5～≤16	1179	1310	4	—	375	40	③
			954℃±8℃ −73℃±6℃ 510℃±6℃		≥2～<5	1380	1550	4	—		46	③
					≥5～≤16	1380	1550	4	—	429	45	③
		固溶处理	见表 1-19		≥0.10～≤100	450	1305	25	—	100HRB	—	④
		沉淀硬化	760℃±15℃ 15℃±3℃ 566℃±6℃	详见表 1-19	≥0.05～<0.30	1170	1310	3	—	—	—	④
					≥0.30～<5.0	1170	1310	5	—	—	—	④
					≥5.0～≤16	1170	1310	4	—	—	—	④

续表

类别	牌号	热处理		厚度/mm	拉伸试验				硬度试验		标准代号
		类型	热处理工艺参数		$R_{p0.2}$/MPa	R_m/MPa	A/%	Z/%	HBW	HRC	
					不小于				不大于		
沉淀硬化型	07Cr15Ni7Mo2Al (0Cr15Ni7Mo2Al)	沉淀硬化	954℃±8℃ −73℃±6℃ 510℃±6℃ 详见表 1-19	≥0.05～<0.30	1380	1550	2	—	—	—	④
				≥0.30～<5.0	1380	1550	4	—	—	—	④
				≥5.0～≤16	1380	1550	4	—	—	—	④
	09Cr17Ni5Mo3N	固溶处理	见表 1-19	≥0.10～<0.30	585	1380	8	—	—	30	②
				≥0.30～≤8.0	585	1380	12	—	—	30	
		沉淀硬化	455℃±8℃ 详见表 1-19	≥0.10～<0.30	1035	1275	6	—	—	42	②
				≥0.30～<5.0	1035	1275	8	—	—	42	
			540℃±8℃ 详见表 1-19	≥0.10～<0.30	1000	1140	6	—	—	36	
				≥0.30～<5.0	1000	1140	8	—	—	36	
		固溶处理	详见表 1-19	≥2～≤102	585	1380	12	—	—	30	③
		沉淀硬化	455℃±10℃ 详见表 1-19	≥2～≤5	1035	1275	8	—	—	42	③
			540℃±10℃ 详见表 1-19	≥2～≤5	1000	1140		—	—	36	③
	06Cr17Ni7AlTi	固溶处理	见表 1-19	≥0.10～<1.50	515	825	84	—	—	32	②
				≥1.50～≤8.0	515	825	5	—	—	32	

续表

类别	牌号	热处理		厚度/mm	拉伸试验				硬度试验		标准代号
		类型	热处理工艺参数		$R_{p0.2}$/MPa	R_m/MPa	A/%	Z/%	HBW	HRC	
					不小于				不大于		
沉淀硬化型	06Cr17Ni7AlTi	沉淀硬化	510℃±8℃ 详见表 1-19	≥0.10～<0.80	1170	1310	3	—	—	39	②
				≥0.80～<1.50	1170	1310	4	—	—	39	
				≥1.50～≤8.0	1170	1310	5	—	—	39	
			538℃±8℃ 详见表 1-19	≥0.10～<0.80	1105	1245	3	—	—	35	
				≥0.80～<1.50	1105	1245	4	—	—	35	
				≥1.50～≤8.0	1105	1245	5	—	—	35	
	06Cr17Ni7AlTi	沉淀硬化	566℃±8℃ 详见表 1-19	≥0.10～<0.80	1035	1170	3	—	—	35	②
				≥0.80～<1.50	1035	1170	4	—	—	35	
				≥1.50～≤8.0	1035	1170	5	—	—	35	
		固溶处理		≥2～≤102	515	825	5	—	—	32	③
		沉淀硬化	510℃±10℃ 详见表 1-19	≥2～<3	1170	1310	5	—	—	39	③
				≥3	1170	1310	8	—	363	39	③
			540℃±10℃ 详见表 1-19	≥2～<3	1105	1240	5	—		37	③
				≥3	1105	1240	8	—	352	38	③
			565℃±10℃ 详见表 1-19	≥2～<3	1035	1170	5	—		35	③
				≥3	1035	1170	8	—	331	36	③

续表

类别	牌号	热处理		厚度/mm	拉伸试验				硬度试验		标准代号
		类型	热处理工艺参数		$R_{p0.2}$/MPa	R_m/MPa	A/%	Z/%	HBW	HRC	
					不小于				不大于		
沉淀硬化型	06Cr17Ni7AlTi	固溶处理	见表 1-19	≥0.10～<0.80	≤515	≤825	≥3	—	—	≤32	④
			见表 1-19	≥0.80～<1.50	≤515	≤825	≥4	—	—	≤32	④
			见表 1-19	≥1.50～≤100	≤515	≤825	≥5	—	—	≤32	④
	06Cr17Ni7AlTi	沉淀硬化	510℃±10℃ 详见表 1-19	≥0.10～<0.75	1170	1310	3	—	—	≥39	④
				≥0.75～<1.50	1170	1310	4	—	—	≥39	④
				≥1.50～≤16	1170	1310	5	—	—	≥39	④
	06Cr17Ni7AlTi	沉淀硬化	538℃±8℃ 详见表 1-19	≥0.10～<0.75	1105	1240	3	—	—	≥37	④
				≥0.75～<1.50	1105	1240	4	—	—	≥37	④
				≥1.50～≤16	1105	1240	5	—	—	≥37	④
			566℃±8℃ 详见表 1-19	≥0.10～<0.75	1035	1170	3	—	—	≥35	④
				≥0.75～<1.50	1035	1170	4	—	—	≥35	④
				≥1.50～≤16	1035	1170	5	—	—	≥35	④
	06Cr15Ni25Ti2-MoAlVB (0Cr15Ni25Ti2-MoAlVB)	固溶处理	见表 1-19	≥2	—	≥725	≥25	—	≤192	≤91HRB	④
			见表 1-19	≥2	≥590	≥900	≥15	—	≤248	≤101HRB	④
		沉淀硬化	700～760℃ 详见表 1-19	≥2.0～<8.0	590	900	15	—	≥248	≥101	④

注：1. ①GB/T 1220—2007《不锈钢棒》。②GB/T 3280—2007《不锈钢冷轧钢板和钢带》。③GB/T 4237—2007《不锈钢热轧钢板和钢带》。④GB/T 4238—2007《耐热钢钢板和钢带》。

2. GB/T 1220—2007《不锈钢棒》马氏体不锈钢的力学性能为淬火回火的力学性能，GB/T 2380—2007《不锈钢冷轧钢板和钢带》14Cr17Ni2 的力学性能为淬火回火拉伸性能，其他标准的马氏体不锈钢力学性能为经退火的马氏体不锈钢力学性能。

论不锈钢板还是耐热钢板，奥氏体型的钢板的综合性能最好，既有足够的强度，又有极好的塑性，同时硬度也不高，这也是它们被广泛采用的原因之一。奥氏体型不锈钢同大多数金属材料相似，其抗拉强度、屈服强度和硬度，随着温度的降低而提高；塑性则随着温度降低而降低。其抗拉强度在15～80℃温度范围内变化较快，温度进一步降低时则变化缓慢，而屈服强度的增长是较为均匀的。更重要的是：随着温度的降低，其冲击韧性减少缓慢，并不存在脆性转变温度。所以18-8型不锈钢在低温时能保持足够的塑性和韧性，如在温度－196℃时，冲击吸收功可达392J；甚至在温度为－270℃的液氦介质中仍保持有足够的冲击值；更难能可贵的是在温度为－273℃的液氢介质中具有阻止应力集中部位发生脆性破裂的能力。因此，这类钢被广泛应用于制造深冷设备。但是，为了防止18-8型不锈钢焊缝产生热裂纹，在焊接材料中要添加一些铁素体形成元素，而铁素体的形成会降低其低温冲击韧度。因此，用于低温工况的18-8型不锈钢焊接材料时，要引起足够的重视。

18-8型不锈钢不仅在低温时具有良好的力学性能，而且在高温时又有较高的热强性（见表1-9、表1-10）。它在900℃的氧化性介质和在700℃的还原性介质中，都能保持其化学稳定性，所以这种钢也是常用的耐热材料。

1.2.3 不锈钢的耐热性能

耐热性能是指在高温下，既有抗氧化或耐气体介质腐蚀的性能（即热稳定性），同时又有足够的强度（即热强性）。不锈钢除了不生锈外，还具有优良的耐高、低温性能，许多不锈钢可兼作耐热钢或低温钢使用。

作为耐热钢使用的不锈钢，多为含碳量较高的铁素体、马氏体和奥氏体不锈钢，它们具有下列特点。

① 保证抗氧化性能需较高含铬量以形成致密氧化膜。能在800℃、1000℃、1100℃仍保持热稳定性的铬的质量分数分别为10%～12%、22%和30%。含Cr量越高抗氧化能力越强。在钢中加入Al和Si等合金元素有助于增强Cr的影响，使钢材表面形成结构致密并与钢材表面牢固结合的氧化膜，如Cr_2O_3、Al_2O_3等合金氧化膜。这种合金氧化膜具有良好的保护作用，从而可延长钢材的使用寿命或提高使用温度。在不锈钢中，若氧化膜主要以$(Fe, Cr)_2O_3$的形式出现时，其抗氧化温度剧变的能力最为优越。

② 保证热强要求的措施。

a. 增Ni以得到稳定的奥氏体组织，利用Mo、W固溶强化，提高原子间结合力。但加Mo对抗氧化性不利。

b. 形成碳化物（MC、$M_{23}C_6$）为主的第二相，为此应适当提高含碳量。

c. 加入微量硼或稀土等以控制晶粒度并强化晶界，如耐热奥氏体不锈钢06Cr15Ni25Ti2MoAlVB。

③ 高温脆化问题。耐热不锈钢在热加工或高温下长期工作时会产生各种脆化现象，如06Cr13（0Cr13）钢在550℃左右的回火脆性，高铬铁素体钢的晶粒长大脆化，奥氏体钢沿晶界析出碳化物造成的脆化以及铁素体钢的475℃脆性、850℃附近的σ相析出脆化，甚至高Cr-Ni奥氏体钢（如25-20）也有σ相析出脆化问题。耐热钢在高温使用过程中要考虑到长期高温工作时可能产生的脆化现象和高温疲劳破坏。疲劳破坏一般由表层或者表面下某些缺陷形成裂纹，裂纹在交变载荷作用下，逐渐扩大，直至断裂。

不锈钢的主要合金元素对耐热性能的影响将在本章第4节予以介绍（表1-13）。表1-11列出了几种耐热钢适用温度范围及主要用途。

在较低温度下，疲劳裂纹是穿晶的，而在高温下的疲劳裂纹是沿晶间发展的。

表 1-9　不锈钢钢管的持久强度[10]

牌号	100000h 持久强度推荐数据/MPa																			
	温度/℃																			
	560	570	580	590	600	610	620	630	640	650	660	670	680	690	700	710	720	730	740	750
07Cr19Ni10	—	—	—	—	96	88	81	74	68	63	57	52	47	44	40	37	34	31	28	26
10Cr18Ni9NbCu3BN	—	—	—	—	—	—	137	131	124	117	107	97	87	79	71	64	57	50	45	39
07Cr25Ni21NbN	—	—	—	—	160	151	142	129	116	103	94	85	76	69	62	56	51	46	—	—
07Cr19Ni11Ti	123	118	108	98	89	80	72	66	61	55	50	46	41	38	35	32	29	26	24	22
07Cr18Ni11Nb	—	—	—	—	132	121	110	100	91	82	74	66	60	54	48	43	38	34	31	28
08Cr18Ni11NbFG	—	—	—	—	—	—	132	122	111	99	90	81	73	66	59	53	48	43	—	—

表 1-10　不锈钢钢管高温屈服强度[11]

序号	钢号	在下列温度(℃)下的 $R_{p0.2}$/MPa										
		20	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550
1	0Cr18Ni9	205	171	155	144	135	127	123	119	114	111	106
2	00Cr19Ni10	175	145	131	122	114	109	104	101	98		
3	0Cr18Ni10Ti	205	171	155	144	135	127	123	120	117	114	111
4	0Cr17Ni12Mo2	205	175	161	149	139	131	126	123	121	119	117
5	00Cr17Ni14Mo2	175	145	130	120	111	105	100	96	93		
6	0Cr18Ni12Mo2Ti	205	175	161	149	139	131	126	123	121	119	117
7	0Cr19Ni13Mo3	205	175	161	149	139	131	126	123	121	119	117
8	00Cr19Ni13Mo3	175	175	161	149	139	131	126	123	121		
9	0Cr25Ni20	205	181	167	157	149	144	139	135	132	128	124
10	1Cr19Ni9	205	171	155	144	135	127	123	119	114	111	106
11	022Cr19Ni5Mo3Si2N(S21953)	440	355	335	325	315	305					
12	022Cr22Ni5Mo3N(S22253)	450	395	370	350	335	325					
13	022Cr23Ni5Mo3N(S22053)	485	425	400	375	360	350					
14	022Cr25Ni7Mo4N(S27053)	550	480	445	420	400	385					
15	06Cr19Ni10(S30408)	210	174	156	144	135	127	123	119	114	111	106
16	022Cr19Ni10(S30403)	180	147	131	122	114	109	104	101	98		
17	06Cr17Ni12Mo2(S31608)	210	178	162	149	139	131	126	123	121	119	117
18	022Cr17Ni12Mo2(S31603)	180	147	130	120	111	105	100	96	93		
19	06Cr18Ni11Ti(S32168)	210	174	156	144	135	127	123	120	117	114	111

注：序号 1～9 为 GB 13296 和 GB/T 14976 的参考值，序号 10 为 GB 9948 和 GB 13296 的参考值，序号 11～14 为 GB/T 21833 的参考值，序号 15～19 为 GB/T 12771 的参考值。

表 1-11 部分耐热钢的适用温度范围及其主要用途[1]

类别	钢 号	适用温度范围及其主要用途
铁素体型	022Cr12(00Cr12)	抗氧化温度 600～700℃，用做高温、高压阀体、燃烧器
	06Cr13Al(0Cr13Al)	适用温度范围 700～800℃，燃气轮机压缩机叶片
	10Cr17(1Cr17)	在 900℃以下抗氧化，用于制作炉用高温部件、喷嘴
马氏体型	12Cr12(1Cr12)	在 600～700℃温度范围内具有一定的抗氧化性和较高的强度，用于制作汽轮机叶片、喷嘴、锅炉燃烧器阀门等
	12Cr13(1Cr13)	抗氧化温度 700～800℃，其用途与 1Cr12 钢相同
奥氏体型	06Cr19Ni10(0Cr18Ni9) 1Cr18Ni9Ti	抗氧化温度 870℃以下，可用做锅炉受热面管子、加热炉件、热交换器、马弗炉、转炉、喷嘴
	06Cr18Ni11Ti(0Cr18Ni10Ti)	在 400～900℃温度范围内抗氧化，可用于工作温度 850℃以下的管件
	06Cr23Ni13(0Cr23Ni13)	抗氧化温度直至 980℃，用于燃烧火管、汽轮机叶片，加热炉体，甲烷变换装置，高温分离装置
	06Cr25Ni20(0Cr25Ni20)	抗氧化温度直至 980℃，用于燃烧炉部件；工作温度在 950℃以下的输气系统部件
	06Cr17Ni12Mo2(0Cr17Ni12Mo2) 06Cr19Ni13Mo3(0Cr19Ni13Mo3)	抗氧化温度 870℃，工作温度 600～750℃的化工、炼油热交换器管子、炉用管部件
沉淀硬化型	0Cr17NiAl	工作温度在 550℃以下的高温承载部件

1.3 不锈钢的耐蚀性能

耐蚀性是指给定的腐蚀体系内，环境引起金属腐蚀的能力[12]。不锈钢的耐腐蚀性能一般随铬含量的增加而提高。其基本原理是，当钢中有足够的铬时，在钢的表面形成非常薄且致密的氧化膜，它可以防止进一步的氧化或腐蚀。氧化性的环境可以强化这种膜，而还原性环境则必然破坏这种膜，造成钢的腐蚀。金属腐蚀是金属在介质作用下逐渐破坏的过程。在同一介质中，不同不锈钢的锈蚀速度不同；而同一不锈钢在不同腐蚀性介质中，锈蚀情况也不一样。金属的腐蚀，按腐蚀机理分为化学腐蚀与电化学腐蚀。

化学腐蚀是指在介质中直接发生的化学作用，即金属同介质中的离子直接交换电荷。钝化防护薄膜之所以能阻止金属再受腐蚀，其重要的一个方面是阻碍其离子交换和电荷交换的速度。

电化学腐蚀是金属在电介质中，由于电极反应而发生的腐蚀。在许多电化学腐蚀过程中，有一种金属与另一种金属共同参与，或者金属内部各不同相的组成物共同参与，即形成所谓的电偶腐蚀。此种情况下，一种金属构成阳极受腐蚀而发生溶解；另一种金属构成阴极而发生还原反应，工程中的金属腐蚀，绝大多数属于电化学腐蚀。

不锈钢的主要腐蚀形式有均匀腐蚀（表面腐蚀）和局部腐蚀，局部腐蚀又分为点腐蚀、缝隙腐蚀、晶间腐蚀和应力腐蚀等。据分析不锈钢的腐蚀破坏，90%以上为局部腐蚀造成的[12]。

1.3.1 均匀腐蚀[1,13]

均匀腐蚀是指接触腐蚀介质的金属表面全部产生腐蚀的现象。均匀腐蚀使金属截面不断减少，对于被腐蚀的受力零件而言，会使其承受的真实应力逐渐增加，最终达到材料的断裂强度而发生断裂。

评定均匀腐蚀的方法是在试验条件下，测出单位面积上经一定时间腐蚀以后所损失的质量 [g/(m^2 · 年)]，即腐蚀速率，若以被腐蚀的深度（mm/年）计，则更便于计算设备的耐

蚀寿命。表 1-12 为耐蚀性分级。

表 1-12　耐蚀性分级[1]

分类	腐蚀速率/(mm/年)	级别
耐蚀性极强	<0.001	1
耐蚀性很强	0.001～0.005	2
	0.005～0.010	3
耐蚀性强	0.010～0.05	4
	0.05～0.10	5
耐蚀性较弱	0.10～0.50	6
	0.50～1.00	7
耐蚀性弱	1.00～5.00	8
	5.00～10.00	9
耐蚀性极弱	>10	10

1.3.2　点腐蚀[1,13]

点腐蚀是指在金属材料表面大部分不腐蚀或腐蚀轻微，而分散发生高度的局部腐蚀，常见蚀点的尺寸小于 1.0mm，深度往往大于表面孔径，轻者为较浅的腐蚀坑，严重的点腐蚀会形成穿孔。

点腐蚀是不锈钢常见的腐蚀破坏类型之一。它是在介质作用下，由于表面有一些缺欠，如夹杂物、贫铬区、晶界、位错在表面暴露出来，使钝化膜在这些地方被破坏，接触腐蚀介质后形成腐蚀坑，然后从外向内发展，从而遭到严重的阳极腐蚀。点腐蚀属于局部腐蚀，不锈钢在含有氯离子（Cl^-）的介质中，最易引起点腐蚀。

在不锈钢中加入钼、锰、硅、钒或稀土合金元素，降低钢中碳的含量，提高铬、镍含量均能有效地提高抗点蚀能力。现有的超低碳高铬镍含钼的奥氏体不锈钢和超高纯低碳低氮含钼的高铬铁素体不锈钢均有较高的耐点腐蚀性能。

1.3.3　缝隙腐蚀

缝隙腐蚀是指由于金属表面或非金属表面形成狭缝或间隙，在狭缝内或近旁发生的局部腐蚀[13]。缝隙腐蚀为斑点状或溃疡形状的宏观腐蚀坑。缝隙腐蚀主要是介质的电化学不均匀性引起的。

缝隙腐蚀常发生在垫圈、铆接、螺钉连接的接缝处，搭接的焊接接头、阀座、堆积的金属片间等处。由于连接的缝隙处被腐蚀产物覆盖以及介质扩散受到限制等原因，导致该处的介质成分和浓度与整体相比有很大差别，形成“闭塞电池腐蚀”作用。

部分奥氏体型不锈钢、铁素体型不锈钢和马氏体型不锈钢在海水中均有不同程度的缝隙腐蚀倾向。在钢中适当地增加铬、钼含量，可以改善抗缝隙腐蚀能力。

1.3.4　晶间腐蚀

沿着或紧挨着金属晶界产生的腐蚀，称之为晶间腐蚀[13]。

晶间腐蚀是一种有选择性的腐蚀破坏，它与一般选择性腐蚀的不同之处在于，腐蚀的局部性是显微尺度的，而宏观上不一定是局部的。这种类型的腐蚀发生以后，有时从外观上不易被察觉，但晶界区因腐蚀已遭到破坏，晶粒间的结合强度几乎完全丧失。腐蚀深度较大者可失去金属声，构件有效承载截面大减而导致过载断裂。受腐蚀严重的金属甚至成为粉末，从构件上脱落下来。这是一种危害性很大的腐蚀破坏。

奥氏体型不锈钢会发生晶间腐蚀是由于这类钢加热到 600～800℃温度区间会发生敏化，

其机理是过饱和固溶的碳向晶粒边界扩散，与晶界附近的铬结合形成铬的碳化物$(CrFe)_{23}C_6$并在晶界沉淀析出；由于碳比铬的扩散快得多，铬来不及从晶内补充到晶界附近，因而晶界区贫铬而形成晶间腐蚀。在某些超低碳含钼奥氏体型不锈钢中，在敏化温度区间的晶界析出铬含量很高的σ相，其邻近区也会贫铬，贫铬的金属在腐蚀介质作用下，首先被腐蚀溶解。这些都是金属出现晶间腐蚀的原因。铁素体型不锈钢也有形成晶间腐蚀的倾向。

1.3.5 应力腐蚀[1,13]

应力腐蚀是指金属在某种特定环境与相应水平应力（拉应力）的共同作用下，以裂纹扩展方式发生的与腐蚀有关的断裂。特定环境下无应力或应力水平太低，不会引起应力腐蚀。同样的，有相当水平应力而无特定环境也不会发生应力腐蚀。所谓特定环境，是指只有当介质的成分和浓度范围适当时，才能导致某种相应金属的应力腐蚀。

不锈钢焊接构件应力腐蚀断裂，断口呈脆性断裂特征。常在未发现的情况下发生断裂，而且是瞬间断裂，往往造成灾难性事故，其危害性极大，因此，不锈钢焊接构件应力腐蚀问题应当引起高度重视。

1.4 各种合金元素对不锈钢组织和性能的影响

下面介绍不锈钢中主要合金元素铬(Cr)、镍(Ni)、硅(Si)、锰(Mn)、钼(Mo)、铜(Cu)、铝(Al)、氮(N)、钛(Ti)、铌(Nb) 和碳(C) 等元素对不锈钢组织和性能的影响。

1.4.1 铬、硅、铝对不锈钢组织和性能的影响[1,14,15]

铬、硅、铝是形成铁素体的元素，是不锈钢获得耐腐蚀性能的主要合金元素。铬是不锈钢最主要的合金元素。铬还是很强的铁素体形成元素，当含铬量超过12.7%时，铁铬合金完全变成单相组织。更重要的是，铬能在钢的表面生成一种与基体组织牢固结合的$(FeCr)_2O_3$致密的氧化膜，起强烈的钝化作用；铬又能提高钢在电介质中的电极电位，从而使钢的化学稳定性得到提高。由于以上原因，不锈钢多为高铬钢，含铬量都在13%以上。硅和铝同样能使钢在氧化性介质中生成致密的保护膜，其中铝的作用比铬还强烈。在奥氏体型耐热钢中，这些元素均能提高其抗氧化性。在18-8型不锈钢中，当硅的质量分数从0.4%提高到2.4%时，钢在980℃时抗氧化性能提高22倍。如果硅含量过高，会严重恶化稳定奥氏体型钢的焊接性，故必须严格控制硅在钢中的含量。铝在沉淀硬化型不锈钢中，可以提高其室温和高温的强度。

1.4.2 镍对不锈钢组织和性能的影响[1,14,15]

镍是扩大奥氏体区的元素，在不锈钢中多与铬配合，以获得奥氏体-铁素体双相组织或单相奥氏体组织，使钢具有更好的耐蚀性和良好的成形性能及焊接性能。镍能使合金表面钝化，扩大钢在酸中的钝化范围，但不能改善其对稀硝酸的耐蚀性。它能提高不锈钢抗硫酸、盐酸等腐蚀介质的性能，是耐蚀钢的主要合金元素。如果单独使用镍作为不锈钢的合金元素，其质量分数要高达24%才能得到全奥氏体组织，而在低碳铬不锈钢（$w_{Cr}>17\%$）的基础上，加入质量分数为9%的镍，即可获得耐蚀性好、综合力学性能好的室温下稳定的奥氏体组织，既能满足钢的耐蚀性要求，又能提高钢的高温强度和抗氧化性能，成为一种具有良好综合性能的钢种。

1.4.3　钼和铜对不锈钢组织和性能的影响[1,14,15]

钼是形成铁素体的元素。在铬不锈钢中加入钼，可以提高钢在非氧化性介质中的稳定性。它的独特之处是能抵抗氯离子（Cl^-）产生的点腐蚀；同时也能提高奥氏体型钢的热强性，改善奥氏体钢短时塑性和持久塑性，对焊接有利。但是钼的加入将会缩小钢中奥氏体相区，使奥氏体型不锈钢中出现铁素体相。为此，在含钼的单相奥氏体不锈钢中，相应的奥氏体形成元素（如镍、锰、氮等）的含量应略有增加，目的是维持其全奥氏体组织。对于双相不锈钢，钼促成铁素体，对提高耐点腐蚀性能和提高抗应力腐蚀性能都是有益的。但钼含量多则会降低奥氏体型不锈钢的韧性。

铜可以提高钢对非氧化性介质的抗蚀能力，进一步扩大钢的稳定性范围。在铬镍不锈钢中加入铜能促使钢产生弥散硬化组织，提高钢的热强性。与钼配合使用，可进一步提高铬镍不锈钢在稀硫酸中的耐蚀性能。列入我国国家标准的牌号有 06Cr18Ni12Mo2Cu2 和 022Cr18Ni14Mo2Cu2 等。

1.4.4　锰和氮对不锈钢组织和性能的影响[1,14,15]

锰和氮，它们都是促进奥氏体形成的元素，其中氮比锰的作用更为强烈。为了节省昂贵的镍的用量，可用它们替代奥氏体型不锈钢中的一部分镍。锰和氮能大大提高铬不锈钢在有机酸中的耐蚀性。

这类钢列入我国国家标准的牌号有 12Cr17Mn6Ni5N（1Cr17Mn6Ni5N）和 12Cr18Mn9Ni5N（1Cr18Mn8Ni5N）。当锰含量过高时，对含铬量较低的不锈钢的耐蚀性不利，还会使铸钢件产生气孔，同时增加材料或接头的硬度，给冷加工带来困难。氮与碳共同作用能提高奥氏体型钢的热强性，氮的强化作用在于时效过程中形成氮化物和碳氮化物。

氮对双相不锈钢有重要作用：在焊接接头热影响区快速冷却时，氮促进了高温下形成的铁素体逆转变为足够的二次奥氏体以维持必要的相平衡，提高了接头的耐蚀性；氮可以提高富氮奥氏体相的耐孔蚀能力，与富铬、钼的铁素体相取得平衡，提高了材料整体的耐孔蚀性能；氮能减轻铬、镍等元素在两相中分布的差异，降低选择腐蚀的倾向性。

1.4.5　钛和铌对不锈钢组织和性能的影响[1,14,15]

钛和铌，它们与碳的亲和力比铬大，能优先形成稳定碳化物，减轻晶间腐蚀倾向。

在铬镍不锈钢中，当钛的加入量大于碳含量的 5 倍，或者铌的加入量大于碳含量的 8 倍时，可以使绝大部分的碳存在于钛或铌的碳化物之中，因而使固溶碳的质量分数降到 0.03%以下，这就能保证铬在钢中的有效固溶浓度。由于铬在钢中的有效固溶浓度得到保证，从而改善钢的抗晶间腐蚀能力。铌的质量分数达到 0.5%～2.0%，既能提高奥氏体钢的热强性，又能提高钢的持久塑性。铌在含碳量较低的奥氏体钢中会促进近缝区和焊缝金属产生裂纹，在铬镍奥氏体钢中铌的质量分数应控制在 1.0%范围内。这类钢列入我国国家标准的牌号很多，如 06Cr18Ni11Ti 和 06Cr18Ni11Nb 等。

1.4.6　碳对不锈钢组织和性能的影响[1,14,15]

碳是奥氏体形成元素，碳对提高奥氏体钢耐热强性有益，但碳对不锈钢的耐蚀性不利，这是因为碳是一种强烈的碳化物形成元素，在不同温度段，它与铬能生成多种化合物，如 $Cr_{23}C_6$，Cr_7C_3 和 Cr_3C_2，$(Fe, Cr)_{23}C_6$。但前两种不可能在不锈钢中出现[12]。碳在不锈钢中大多数情况下形成 $(Fe, Cr)_{23}C_6$ 混合碳化物，即 $M_{23}C_6$。在高碳的铸造耐热钢中，共晶碳化物多出现在晶间或枝间，二次碳化则在晶内和晶间都有。在铁素体不锈钢或铬镍奥氏体不锈钢中，

若碳在过饱和情况下，受到适当温度加热，则会发生碳化物 $M_{23}C_6$ 析出。这些固溶体层的铬碳化合物最易在晶界处生成。若条件适当，当加 $w_{Cr}<12\%$ 时，晶粒边界会出现贫铬，即减少了晶界的铬有效含量，导致钢的耐腐蚀性能降低——产生晶间腐蚀。因而碳是降低耐腐蚀性的一种有害元素，不锈钢若以耐腐蚀为主要目的时，不锈钢碳的含量愈少，耐腐蚀性愈好。在我国不锈钢的牌号中，$w_C\leqslant 0.08\%$ 或 $\leqslant 0.06\%$ 的，称之为低碳不锈钢，例如：06Cr19Ni10。$w_C\leqslant 0.03\%$ 的称之为超低碳不锈钢，例如：022Cr19Ni10。

上述合金元素对钢的作用不是简单的叠加，也不是相互抵消的。它们相互之间有时会发生新的物理化学作用，往往会引起强化力学性能的作用。各种合金元素对不锈钢组织结构和性能的影响见表 1-13，亦可参见图 1-1、图 1-2。从表中可以看出，合金元素对不锈钢组织的影响基本上分三大类：第一类是形成铁素体的元素，有铬、硅、铝、钼、钛、铌等；第二类是形成奥氏体的元素，有碳、氮、镍、锰、铜，其中碳和氮的作用程度最大；第三类是形成碳化物的元素，有铌、钛、碳、铬、钨、锰、钼等。加入铜、铝、钛、铌、氮等元素能促使钢产生弥散硬化，从而提高钢的热强性。

表 1-13 各种合金元素对不锈钢组织结构和性能的影响[1]

合金元素	对组织结构的影响			对性能的影响						
	形成铁素体	形成奥氏体	形成碳化物	防止晶间腐蚀	增加耐腐蚀性	提高抗氧化性	提高高温强度	增强时效硬化	改善机械加工性	细化晶粒
铝(Al)	A		B			A		A		
碳(C)		A	B				B			
铬(Cr)	B				A	A				
钴(Co)							A			
铌(Nb)	B		A	A			A	A		B
铜(Cu)					A			B		
锰(Mn)		C	C							
钼(Mo)	B		C		A		B			
镍(Ni)		B			A	B	B			
氮(N)		A					B			B
磷(P)								B	A	
硒(Se)									A	
硅(Si)	B				B	A		B		
硫(S)									A	
钽(Ta)	B		B	B			B	B		
钛(Ti)	A		A	A		B	B	B		A
钨(W)	C		B				B			A
钒(V)	C		B				B			

注：A 表示强作用；B 表示中等作用；C 表示弱作用。

1.5 各国不锈钢牌号表示方法

1.5.1 中国不锈钢牌号表示方法

根据 GB/T 221—2008《钢铁产品牌号表示方法》的规定，不锈钢或耐热钢的牌号采用化

学元素符号和表示各元素含量的阿拉伯数字表示。各元素含量的阿拉伯数字应符合下述规定。

(1) 用两位或三位阿拉伯数字表示碳含量最佳控制值（以万分之几或十万分之几计）

① 只规定碳含量上限者，当碳含量上限不大于 0.10%时，以其上限的 3/4 表示碳含量；当碳含量上限大于 0.10%时，以其上限的 4/5 表示碳含量。例如：碳含量上限为 0.08%，碳含量以 06 表示；含碳量上限为 0.20%，含碳量以 16 表示；碳含量上限为 0.15%，碳含量以 12 表示。

② 对超低碳不锈钢（即碳含量不大于 0.030%），用三位阿拉伯数字表示最佳控制值（以十万分之几计）。

例如：含碳量上限为 0.030%，其牌号中的碳含量以 022 表示；含碳量上限为 0.020%时，其牌号中的碳含量以 015 表示。

③ 规定上、下限者，以平均碳含量×100 表示。

例如：含碳量为 0.16%～0.25%时，其牌号中的碳含量以 20 表示。

(2) 合金元素含量以化学元素符号及阿拉伯数字表示

具体表示方法为：平均含量小于 1.50%时，牌号中仅标明元素，一般不标明含量；平均含量为 1.50%～2.49%、2.50%～3.49%、3.50%～4.49%、4.50%～5.49%……时，在合金元素后相应写成 2、3、4、5……钢中有意加入的铌、钛、锆、氮等合金元素，虽然含量很低，但是也应在材料牌号中标出。

注：化学元素符号的排列顺序，推荐按含量值递减排列。如果两个或多个元素的含量相等时，相应符号位置按英文字母的顺序排列。

(3) 不锈钢材料牌号示例

① 碳含量不大于 0.08%，铬含量为 18.00%～22.00%，镍含量为 8.00%～11.00%的不锈钢，牌号为 06Cr19Ni10。

② 碳含量不大于 0.030%，铬含量为 16.00%～19.00%，钛含量为 0.10%～1.00%的不锈钢，牌号为 022Cr18Ti。

③ 碳含量不大于 0.030%，铬含量为 14.00%～16.00%，镍含量为 1.50%～3.00%，氮含量为 0.15%～0.30%的不锈钢，牌号为 20Cr15Ni2N。

④ 碳含量不大于 0.25%，铬含量为 24.00%～26.00%，镍含量为 19.00%～22.00%的耐热钢，牌号为 20Cr25Ni20。

1.5.2　国外不锈钢牌号表示方法

各国标准的不锈钢牌号都力求与国际上统一，以适应国际技术交流和国际贸易往来的需要，也都力求将最先进的、综合性能最好的牌号列入本国标准，以提高本国不锈钢的生产水平，满足各部门对不锈钢产品不断提高的要求。目前普遍被认为是先进水平的不锈钢材料标准包括美国 ASTM、日本 JIS、德国 DIN、法国 NF、英国 BS 和国际标准化组织 ISO 标准，其中美国 ASTM 标准的不锈钢牌号反映了世界不锈钢生产的先进水平。

(1) 美国（ASTM）标准不锈钢材料牌号表示方法[16]

美国钢铁牌号表示方法较多，不锈钢普遍采用 AISI 牌号表示方法。目前，ASTM 不锈钢标准主要采用 UNS（Unified Numbering System for Metals and Alloys，金属与合金统一编号系统）和 AISI 两种牌号表示方法，在标准中对照列出，今后将逐步过渡为 UNS 牌号系列。

A1SI：采用三位阿拉伯数字表示。第一位数字表示类别，第二、三位数字表示顺序号。

第一位数字类别：2—Cr-Ni-Mn 系；3—Cr-Ni 系；4—Cr 系；5—低 Cr 系（6—沉淀硬化系）。举例：201、304、403、504。

UNS：由一个前缀字母和5个阿拉伯数字组合表示。不锈钢前缀字母为S，第一位数字表示类别，后四位数字表示顺序号。并且除表示类别的数字1以外，前三位数字代号基本上采用了AISI的牌号表示方法。

第一位数字类别：1—沉淀硬化系；2—Cr-Ni-Mn系；3—Cr-Ni系；4—Cr系；5—低Cr系。后两位数字一般为“00”，“03”表示超低碳，其他数字则用来表示主要化学成分相同而个别成分稍有差异，或含有其他特殊合金元素。举例：S20100、S30400、S30403、S30451。

（2）日本（JIS）标准不锈钢材料牌号表示方法[16]

日本JIS不锈钢材料标准的牌号表示方法为SUS+数字编号。其中，S：钢；U：用途；S：不锈；数字编号基本采用美国AISI的牌号表示方法。

根据AISI的牌号表示方法，即：2—Cr-Ni-Mn系；3—Cr-Ni系；4—Cr系（6—沉淀硬化系）。

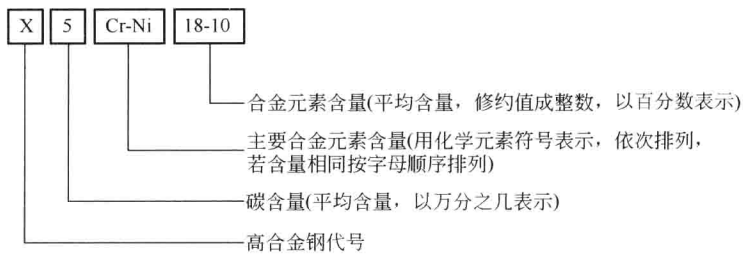
日本独特的牌号，采用类似的AISI牌号在其后加J1、J2来表示。举例：SUS201、SUS304、SUS304J1。

按照钢材的形状、用途和制造方法等，当需要用代号表示时，在牌号后面加上相应的代号，如下所示：B：棒材；CB：冷加工棒材；HP：热轧钢板；CP：冷轧钢板；HS：热轧钢带；CS：冷轧钢带；CSP：弹簧用钢带；WR：线材；Y：焊接用线材；W：钢丝；WP：弹簧用钢丝；WS：冷镦用钢丝；HA：热轧角钢；CA：冷轧角钢；TB：锅炉及热交换器用钢管；TPY：配管用电焊大口径钢管；TP：配管用钢管；TPD：一般配管用钢管。举例：SUS304-B、SUS304-WR、SUS304-HP。

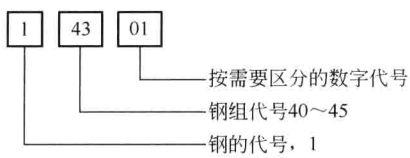
（3）德国（DIN）标准不锈钢材料牌号表示方法[16]

德国DIN标准不锈钢牌号表示方法有两种。

字母符号表示方法：



数字表示方法：



40——Ni<2.5%，无Mo、Nb和Ti；

41——Ni<2.5%，含Mo，无Nb和Ti；

43——Ni≥2.5%，无Mo、Nb和Ti；

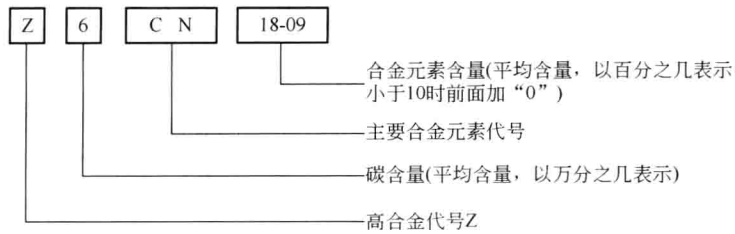
44——Ni≥2.5%，含Mo，无Nb和Ti；

45——含特殊添加元素。

举例：X5CrNi18-10，1.4301；X6Cr13，1.4000。

（4）法国（NF）标准不锈钢材料牌号表示方法[16]

法国NF标准不锈钢牌号表示方法：



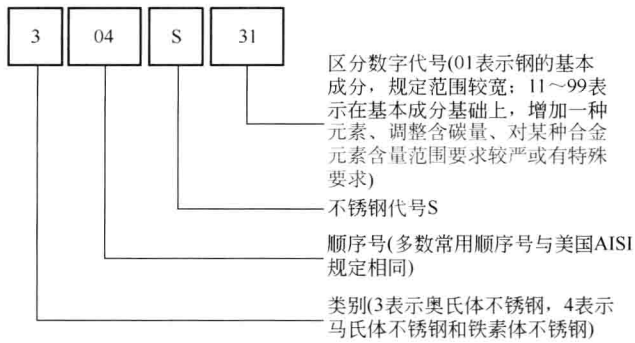
合金元素代号：

元素	Cr	Co	Mn	Ni	Si	Al	Cu	Mo	P	W	V	Ti	Nb
代号	C	K	M	N	S	A	U	D	P	W	V	T	Nb

举例：Z6CN18-09。

(5) 英国 (BS) 标准不锈钢材料牌号表示方法[16]

英国 BS 标准不锈钢牌号表示方法：



举例：304S31。

1.5.3　中国、美国、日本等国家不锈钢标准目录

(1) 中国常用不锈钢标准目录

常用母材标准目录如下。

GB/T 1220—2007《不锈钢棒》

GB/T 3089—2008《不锈钢极薄壁无缝钢管》

GB/T 3090—2000《不锈钢小直径无缝钢管》

GB/T 3280—2007《不锈钢冷轧钢板和钢带》

GB/T 4226—2009《不锈钢冷加工钢棒》

GB/T 4237—2007《不锈钢热轧钢板和钢带》

GB/T 4238—2007《耐热钢钢板和钢带》

GB/T 4240—2009《不锈钢丝》

GB/T 4356—2002《不锈钢盘条》

GB/T 8165—2008《不锈钢复合钢板和钢带》

GB/T 12770—2002《机械结构用不锈钢焊接钢管》

GB/T 12771—2008《流体输送用不锈钢焊接钢管》

GB 13296—2013《锅炉、热交换器用不锈钢无缝钢管》

GB/T 14975—2002《结构用不锈钢无缝钢管》

GB/T 14976—2002《流体输送用不锈钢无缝钢管》

GB/T 20878—2007《不锈钢和耐热钢牌号及化学成分》

GB/T 21832—2008《奥氏体-铁素体型双相不锈钢焊接钢管》

GB/T 21833—2008《奥氏体-铁素体型双相不锈钢无缝钢管》
GB/T 28713.2—2012《管壳式热交换器用强化传热元件　第2部分：不锈钢波纹管》
GB/T 30073—2013《核电站热交换器用奥氏体不锈钢无缝管》
NB/T 47010—2010（JB/T 4728）《承压设备用不锈钢和耐热钢锻件》
YB/T 5089—2007《锻制用不锈钢坯》
YB/T 5090—1993《不锈钢热轧钢带》
YB/T 5309—2006《不锈钢热轧等边角钢》
常用焊接材料标准目录如下。
GB/T 983—2012《不锈钢焊条》
GB/T 4240—2009《不锈钢丝》
GB/T 4241—2006《焊接用不锈钢盘条》
GB/T 4356—2002《不锈钢盘条》
NB/T 47018.2—2011《承压设备用焊接材料订货技术条件　第2部分：钢焊条》
NB/T 47018.4—2011《承压设备用焊接材料订货技术条件　第4部分：埋弧焊钢焊丝和焊剂》
NB/T 47018.5—2011《承压设备用焊接材料订货技术条件　第5部分：堆焊用不锈钢焊带和焊剂》
YB/T 5091—1993《惰性气体保护焊接用不锈钢棒及钢丝》
YB/T 5092—2005《焊接用不锈钢丝》
（2）美国ASTM不锈钢标准目录
A193/A193M—1994b《高温用合金钢、不锈钢螺栓材料》
A276—1996《不锈钢棒材和型钢》
A314—1995《锻件用不锈钢钢坯和棒材》
A473—1995a《不锈钢锻件》
A479/A479M—1996《锅炉和其他压力容器用不锈钢棒材和型钢》
A484/A484M—1996《不锈钢棒材、钢坯和锻件一般要求》
A564/A564M—1995《热轧和冷加工时效硬化不锈钢棒材和型钢》
A565—1992《高温用马氏体不锈钢棒材、锻件和锻坯》
A582/A582M—1995b《易切不锈钢棒材》
A705/A705M—1995《时效硬化不锈钢锻件》
A831/A831M—1995《冷却反应堆芯部件的液态金属用奥氏体和马氏体不锈钢棒材、钢坯和锻件》
A167—1996《不锈和耐热铬-镍钢厚板、薄板和钢带》
A176—1996《不锈和耐热铬钢厚板、薄板和钢带》
A177—1984《高强度不锈和耐热铬-镍钢薄板和钢带》
A240/A240M—1996a《耐热铬和铬-镍不锈钢厚板、薄板和钢带》
A263—1994a《耐腐蚀铬复合钢厚板、薄板和钢带》
A264—1994a《不锈铬-镍复合钢厚板、薄板和钢带》
A412—1987《不锈和耐热铬-镍-锰钢厚板、薄板和钢带》
A480/A480M—1996a《扁平轧制不锈钢和耐热钢厚板、薄板和钢带一般要求》
A666—1996b《退火或冷加工奥氏体不锈钢薄板、钢带、厚板和扁钢》
A693—1993《沉淀硬化不锈和耐热钢厚板、薄板和钢带》
A793—1996《地板用不锈钢轧制厚板》
A887—1989（1994）《核工业用硼酸处理不锈钢厚板、薄板和钢带》
A895—1989（1994）《易切不锈钢厚板、薄板和钢带》
A947M—1995《有纹理不锈钢薄钢板》

A268/A268M—1996《一般用无缝和焊接铁素体和马氏体不锈钢管》
A269—1996《一般用无缝和焊接奥氏体不锈钢管》
A270—1990《卫生设备用无缝和焊接奥氏体不锈钢管》
A312/A312M—1994b《无缝和焊接奥氏体不锈钢管》
A511—1990《无缝不锈钢机械管》
A554—1994《焊接不锈钢机械管》
A632—1990《一般用无缝和焊接奥氏体不锈钢管（小直径）》
A688/A688M—1991《焊接奥氏体不锈钢供热水管》
A731/A731M—1991《无缝和焊接铁素体及马氏体不锈钢管》
A733—1993《碳素钢和奥氏体不锈钢焊接和无缝螺纹钢管》
A778—1990a《焊接未退火奥氏体不锈钢管制品》
A789/A789M—1995《一般用无缝和焊接铁素体/奥氏体不锈钢管》
A790/A790M—1994《无缝和焊接铁素体/奥氏体不锈钢管》
A791/A791M—1994《焊接未退火铁素体不锈钢管》
A803/A803M—1994《供热水用铁素体不锈钢焊接钢管》
A813/A81.3M—1991《单焊或双焊奥氏体不锈钢管》
A928/A928M—1994《填充金属电熔焊铁素体/奥氏体不锈钢管》
A313/A313M—1995a《不锈钢弹簧钢丝》
A493—1995《冷镦和冷锻用不锈钢丝和线材》
A555/A555M—1994a《不锈钢丝和线材一般要求》
A580/A580M—1995a《不锈钢丝》
A581/A581M—1995b《易切不锈钢丝和线材》
（3）日本 JIS 不锈钢标准目录
G4303—1991《不锈钢棒材》
G4317—1991《热轧不锈钢等边角钢》
G4318—1991《冷精轧不锈钢棒材》
G4319—1991《不锈钢锻件用钢坯》
G4320—1991《冷加工成形不锈钢等边角钢》
G3320—1991《涂层不锈钢板》
G3601—1989《不锈复合钢》
G4304—1991《热轧不锈钢板和钢带》
G4305—1991《冷轧不锈钢板和钢带》
G4307—1987《冷轧不锈钢带》
G4313—1988《弹簧用不锈钢带》
G3446—1994《机械结构用不锈钢管》
G3448—1994《普通管路用不锈钢管》
G3459—1994《管路用不锈钢管》
G3463—1994《锅炉与热交换器用不锈钢管》
G3468—1994《管道用电弧焊大口径不锈钢管》
G4308《不锈钢线材》
G4309《不锈钢丝》
G4316《焊接用不锈钢丝》

1.5.4　国内外主要不锈钢牌号

国内外主要不锈钢牌号及对照见表 1-14、表 1-15。

表 1-14 各国不锈钢和耐热钢牌号对照[9]

序号	中国 GB/T 20878—2007			美国 ASTM A959—2004	日本 JIS G4303—1998 JIS G4311—1991	国际 ISO/TS 15510:2003 ISO 4955:2005	欧洲 EN 10088:1—1995 EN 10095—1999 等	俄罗斯 ГОСТ 5632—1972
	统一数字代号	新牌号	旧牌号					
1	S35350	12Cr17Mn6Ni5N	1Cr17Mn6Ni5N	S20100.201	SUS201	X12CrMnNiN17-7-5	X12CrMnNiN-17-7-5,1.4372	—
2	S35950	10Cr17Mn9Ni4N		—	—	—	—	12Х17Г9АН4
3	S35450	12Cr18Mn9Ni5N	1Cr18Mn8Ni5N	S20200.202	SUS202	—	X12CrMnNiN18-9-5,1.4373	12Х17Г9АН4
4	S35020	20Cr13Mn9Ni4	2Cr13Mn9Ni4	—	—	—	—	20Х13Н4Г9
5	S35550	20Cr15Mn15Ni2N	2Cr15Mn15Ni2N	—	—	—	—	—
6	S35650	53Cr21Mn9Ni4N	5Cr21Mn9Ni4N	(S63008)	SUH35	(X53CrMnNi21-9)	X53CrMnNiN-21-9-4,1.4871	55Х20Г9АН4
7	S35750	26Cr18Mn12Si2N	3Cr18Mn12Si2N	—	—	—	—	—
8	S35850	22Cr20Mn10Ni3Si2N	2Cr20Mn9Ni3Si2N	—	—	—	—	—
9	S30110	12Cr17Ni7	1Cr17Ni7	S30100.301	SUS301	X5CrNi17-7	X3CrNiN17-8,1.4319	—
10	S30103	022Cr17Ni7		S30103.301L	(SUS301L)	—	—	—
11	S30153	022Cr17Ni7N		S30103.301LN	—	X2CrNi18-7	X2CrNiN18-7,1.4318	—
12	S30220	17Cr17Ni9	2Cr18Ni9	—	—	—	—	17Х18Н9
13	S30210	12Cr18Ni9	1Cr18Ni9	S30200.302	SUS302	X10CrNi18-8	X10CrNi18-8,1.4310	12Х18Н9
14	S30240	12Cr18Ni9Si3	1Cr18Ni9Si3	S30215.302B	(SUS302B)	X12CrNiSi18-9-3	—	—
15	S30317	Y12Cr18Ni9	Y1Cr18Ni9		SUS303	X10CrNiS18-9	X8CrNiS18-9,1.4305	—
16	S30327	Y12Cr18Ni9Se	Y1Cr18Ni9Se	S30323.303Se	SUS303Se		—	12Х18Н10Е
17	S30408	06Cr19Ni10	0Cr18Ni9	S30400.304	SUS304	X5CrNi18-10	X5CrNi18-10,1.4301	—
18	S30403	022Cr19Ni10	00Cr19Ni10	S30403.304L	SUS304L	X2CrNi19-11	X2CrNi19-11,1.4306	03Х18Н11
19	S30409	07Cr19Ni10		S30409.304H	SUH304H	X7CrNi18-9	X6CrNi18-10,1.4948	—
20	S30450	05Cr19Ni10Si2CeN		S30415	—	X6CrNiSiNCe19-10	X6CrNiNCe19-10,1.4818	—

续表

序号	中国 GB/T 20878—2007			美国 ASTM A959—2004	日本 JIS G4303—1998 JIS G4311—1991	国际 ISO/TS 15510:2003 ISO 4955:2005	欧洲 EN 10088:1—1995 EN 10095—1999 等	俄罗斯 ГОСТ 5632—1972
	统一数字代号	新牌号	旧牌号					
21	S30480	06Cr18Ni9Cu2	0Cr18Ni9Cu2	—	SUS304J3	—	—	—
22	S30488	06Cr18Ni9Cu3	0Cr18Ni9Cu3	—	SUSXM7	X3CrNiCu18-9-4	X3CrNiCu-18-9-4,1.4567	—
23	S30458	06Cr19Ni10N	0Cr19Ni9N	S30451.304N	SUS304N1	X5CrNiN19-9	X5CrNiN19-9,1.4315	—
24	S30478	06Cr19Ni9NbN	0Cr19Ni10NbN	S30452.XM-21	SUS304N2	—	—	—
25	S30453	022Cr19Ni10N	00Cr18Ni10N	S30453.304LN	SUS304LN	X2CrNiN18-9	X2CrNiN18-10,1.4311	—
26	S30510	10Cr18Ni12	1Cr18Ni12	S30500.305	SUS305	X6CrNi18-12	X4CrNi18-12,1.4303	12X18H12T
27	S30508	06Cr18Ni12	0Cr18Ni12		SUS305J1	—	—	—
28	S38108	06Cr16Ni18	0Cr16Ni18	S38400	(SUS384)	(X6CrNi18-16E)	—	—
29	S30808	06Cr20Ni11		S30800.308	SUS308	—	—	—
30	S30850	22Cr21Ni12N	2C21Ni12N	(S63017)	SUH37	—	—	—
31	S30920	16Cr23Ni13	2Cr23Ni13	S30900.309	SUH309	—	(X15CrNiSi-20-12,1.4828)	20X23H12
32	S30908	06Cr23Ni13	0Cr23Ni13	S30908.309S	SUS309S	X12CrNi23-13	X12CrNi23-13,1.4833	10X23H13
33	S31010	14Cr23Ni18	1Cr23Ni18	—		—	—	20X23H18
34	S31020	20Cr25Ni20	2Cr25Ni20	S31000.310	SUH310	X15CrNi25-21	X15CrNi25-21.1.4821	20X25H20C2
35	S31008	06Cr25Ni20	0Cr25Ni20	S31008.310S	SUS310S	X12CrNi23-12	X12CrNi23-12,1.4845	10X23H18
36	S31053	022Cr25Ni22Mo2N		S31050.310MoLN	—	X1CrNiMoN23-22-2	X1CrNiMoN25-22-2,1.4466	—
37	S31252	015Cr20Ni18Mo6CuN		S31251	—	X1CrNiMoN20-18-7	X1CrNiMoN20-18-7.1.4547	—
38	S31608	06Cr17Ni12Mo2	0Cr17Ni12Mo2	S31600.316	SUS316	X5CrNiMo17-12-2	X5CrNiMo17-12-2,1.4401	—
39	S31603	022Cr17Ni12Mo2	00Cr17Ni14Mo2	S31603.316L	SUS316L	X2CrNiMo17-12-2	X2CrNiMo17-12-2,1.4404	03X17H14M2

续表

序号	中国 GB/T 20878—2007			美国 ASTM A959—2004	日本 JIS G4303—1998 JIS G4311—1991	国际 ISO/TS 15510:2003 ISO 4955:2005	欧洲 EN 10088:1—1995 EN 10095—1999 等	俄罗斯 ГОСТ 5632—1972
	统一数字代号	新牌号	旧牌号					
40	S31609	07Cr17Ni12Mo2	1Cr17Ni12Mo2	S31609.316H			X3CrNiMo17-13-3,1.4436	—
41	S31668	06Cr17Ni12Mo3Ti	0Cr18Ni12Mo3Ti	S31635.316Ti	SUS316Ti	X6CrNiMoTi17-12-2	X6CrNiMoTi-17-12-2,1.4751	08X17H13M3T
42	S31678	06Cr17Ni12Mo2Nb		S31640.316Nb	—	X6CrNiMoNb17-12-2	X6CrNiMoNb-17-12-2,1.4580	03X16H13M3Б
43	S31658	06Cr17Ni12Mo2N	0Cr17Ni12Mo2N	S31651.316N	SUS316N	—	—	—
44	S31653	022Cr17Ni12Mo2N	00Cr17Ni13Mo2N	S31653.316LN	SUS316LN	X2CrNiMoN17-12-3	X2CrNiMoN17-13-3,1.4429	—
45	S31688	06Cr18Ni12Mo2Cu2	0Cr18Ni12Mo2Cu2	—	SUS316J1	—	—	—
46	S31683	022Cr18Ni14Mo2Cu2	00Cr18Ni14Mo2Cu2	—	SUS316J1L	—	—	—
47	S31693	022Cr18Ni15Mo3N	00Cr18Ni15Mo3N	—	—	—	—	—
48	S31782	015Cr21Ni26Mo5Cu2		N08904.901L	—	—	—	—
49	S31708	06Cr19Ni13Mo3	0Cr19Ni13Mo3	S31700.317	SUS317	—	—	—
50	S31703	022Cr19Ni13Mo3	00Cr19Ni13Mo3	S31703.317L	SUS317L	X2CrNiMo19-14-4	X2CrNiMo18-15-4,1.4438	03X16H15M3
51	S31793	022Cr18Ni14Mo3	00Cr18Ni14Mo3	—	—	—	—	—
52	S31794	03Cr18Ni16Mo5	0Cr18Ni16Mo5	—	SUS317J1	—	—	—
53	S31723	022Cr19Ni16Mo5N		S31726.317LMN	—	X2CrNiMoN18-15-5	X2CrNiMoN17-13-5,1.4439	—
54	S31753	022Cr19Ni13Mo4N		S31753.317LN	SUS317LN	X2CrNiMoN18-12-4	X2CrNiMoN-18-12-5.4,1.4434	—
55	S32168	06Cr18Ni11Ti	0Cr18Ni10Ti	S32100.321	SUS321	X6CrNiTi18-10	X6CrNiTi18-10,1.4541	08X18H10T
56	S32169	07Cr19Ni11Ti	1Cr18Ni11Ti	S32109.321H	(SUS321H)	X7CrNiTi18-10	X6CrNiTi18-10,1.4541	12X18H11T
57	S32590	45Cr14Ni14W2Mo	4Cr14Ni14W2Mo	—	—	—	—	45X14H14B2M

续表

序号	中国 GB/T 20878—2007			美国 ASTM A959—2004	日本 JIS G4303—1998 JIS G4311—1991	国际 ISO/TS 15510:2003 ISO 4955:2005	欧洲 EN 10088:1—1995 EN 10095—1999 等	俄罗斯 ГОСТ 5632—1972
	统一数字代号	新牌号	旧牌号					
58	S32652	015Cr24Ni22-Mo8Mn3CuN		S32654		X1CrNiMoCu24-22-8	(X1CrNiMoCuN-24-22-8,1.4652)	—
59	S32720	24Cr18Ni8W2	2Cr18Ni8W2	—	—	—	—	25X18H8B2
60	S33010	12Cr16Ni35	1Cr16Ni35	N08330.330	SUH330	(X12CrNiSi35-16)	X12CrNiSi-35-16,1.4864	—
61	S34553	022Cr24Ni-17Mo5Mn6NbN		S34565		X2CrNiMnMoN-25-18-6-5	(X2CrNiMnMoN-25-18-6-5,1.4565)	—
62	S34778	06Cr18Ni11Nb	0Cr18Ni11Nb	S34700.347	SUS347	X6CrNiNb18-10	X6CrNiNb-18-10,1.4550	08X18H12B
63	S34779	07Cr18Ni11Nb	1Cr18Ni11Nb	S34709.347H	(SUS347H)	X7CrNiNb18-10	X7CrNiNb-18-10,1.4912	—
64	S34748	06Cr18Ni13Si4	0Cr18Ni13Si4	—	SUSXM15J1	S38100.XM-15	—	—
65	S38240	16Cr20Ni14Si2	1Cr20Ni14Si2		—	X15CrNiSi20-12	X15CrNiSi-20-12,1.4828	2014C2
66	S38340	16Cr25Ni20Si2	1Cr25Ni20Si2	—	—	(X15CrNiSi25-21)	(X15CrNiSi-25-21,1.4811)	20X25H20C2
67	S21860	14Cr18Ni11Si4AlTi	1Cr18Ni11Si4AlTi	—	—		—	15X18H12C1Tю
68	S21953	022Cr19Ni5Mo3Si2N	00Cr18Ni5Mo3Si2	S31500	—	—	—	—
69	S22160	12Cr21Ni5Ti	1Cr21Ni5Ti	—	—	—	—	10X21H5T
70	S22253	022Cr22Ni5Mo3N		S31803	SUS320J31	X2CrNiMoN22-5-3	X2CrNiMoN-22-5-3,1.4462	—
71	S22053	022Cr23Ni5Mo3N		S32205.2205	—	—	—	—
72	S23043	022Cr23Ni4MoCuN		S32304.2304	—	X2CrNi23-4	X2CrNi23-4,1.4362	—

续表

序号	中国 GB/T 20878—2007			美国 ASTM A959—2004	日本 JIS G4303—1998 JIS G4311—1991	国际 ISO/TS 15510:2003 ISO 4955:2005	欧洲 EN 10088:1—1995 EN 10095—1999 等	俄罗斯 ГОСТ 5632—1972
	统一数字代号	新牌号	旧牌号					
73	S22553	022Cr25Ni6Mo2N		S31200	—	X3CrNiMoN27-5-2	X3CrNiMoN27-5-2,1.4460	—
74	S22583	022Cr25Ni7Mo3WCuN		S31260	(SUS329J2L)	—	—	—
75	S22554	03Cr25Ni6Mo3Cu2N		S32550.255	SUS329J4L	X2CrNiMoCuN25-6-3	X2CrNiMoCuN-25-6-3,1.4507	—
76	S25073	022Cr25Ni7Mo4N		S32750.2507	—	X2CrNiMoN25-7-4	X2CrNiMoN-25-7-4,1.4410	—
77	S27603	022Cr25Ni7Mo4WCuN		S32760	—	X2CrNiMoWN25-7-4	X2CrNiMoWN-25-7-4,1.4501	—
78	S11348	06Cr13Al	0Cr13Al	S40500.405	SUS405	X6CrAl13	X6CrAl13,1.4002	—
79	S11168	06Cr11Ti	0Cr11Ti	S40900	(SUH409)	X6CrTi12	—	—
80	S11163	022Cr11Ti		S40900	(SUH409L)	X2CrTi12	X2CrTi12,1.4512	—
81	S11173	022Cr11NbTi		S40930	—	—	—	—
82	S11213	022Cr12Ni		S40977	—	X2CrNi12	X2CrNi12,1.4003	—
83	S11203	022Cr12	00Cr12	SUS410L	—	—	—	—
84	S11510	10Cr15	1Cr15	S42900.429	(SUS429)	—	—	—
85	S11710	10Cr17	1Cr17	S4300	SUS430	X6Cr17	X6Cr17,1.4016	12X17
86	S11717	Y10Cr17	Y1Cr17	S43020.430F	SUS430F	X7CrS17	X14CrMoS17,1.4104	—
87	S11863	022Cr18Ti	00Cr17	S43035.439	(SUS430LX)	X3CrTi17	X3CrTi17,1.4510	08X17T
88	S11790	10Cr17Mo	1Cr17Mo	S43400.434	SUS434	X6CrMo17-1	X6CrMo17-1,1.4113	—
89	S11770	10Cr17MoNb		S43600.436	—	X6CrMoNb17-1	X6CrMoNb17-1,1.4526	—
90	S11862			—	(SUS436L)	—	—	—
91	S11873	022Cr18NbTi		S4390	—	X2CrTiNb18	X2CrTiNb18,1.4509	—

续表

序号	中国 GB/T 20878—2007			美国 ASTM A959—2004	日本 JIS G4303—1998 JIS G4311—1991	国际 ISO/TS 15510:2003 ISO 4955:2005	欧洲 EN 10088:1—1995 EN 10095—1999 等	俄罗斯 ГОСТ 5632—1972
	统一数字代号	新牌号	旧牌号					
92	S11972	019Cr19Mo2NbTi	00Cr18Mo2	S44400.444	(SUS444)	X2CrMoTi18-2	X2CrMoTi18-2,1.4521	—
93	S12550	16Cr25N	2Cr25N	S44600.446	(SUH446)	—	—	—
94	S12791	008Cr27Mo	00Cr27Mo	S44627.XM-27	SUSXM27	—	—	—
95	S13091	008Cr30Mo2	00Cr30Mo2		SUS417J1	—	—	—
96	S40310	12Cr12	1Cr12	SUS40300.403	SUS403	—	—	—
97	S41008	06Cr13	0Cr13	S41008.410S	(SUS410S)	X6Cr13	X6Cr13,1.4000	08X13
98	S41010	12Cr13	1Cr13	S41000.410	SUS410	X12Cr13	X12Cr13,1.4006	12X13
99	S41595	04Cr13Ni5Mo		S41500	(SUSF6NM)	X3CrNiMo13-4	X3CrNiMo13-4,1.4313	—
100	S41617	Y12Cr13	Y1Cr13	S41600.416	SUS416	X12CrS13	X12CrS13,1.4005	—
101	S42020	20Cr13	2Cr13	S4200.420	SUS420J1	X20Cr13	X20Cr13,1.4021	20X13
102	S42030	30Cr13	3Cr13	S42000.420	SUS420J2	X30Cr13	X30Cr13,1.4028	30X13
103	S42037	Y30Cr13	Y3Cr13	S42020.420F	SUS420F	X29CrS13	X29CrS13,1.4029	—
104	S42040	40Cr13	4Cr13	—	—	X39Cr13	X39Cr13,1.4031	40X13
105	S41427	Y25Cr13Ni2	Y2Cr13Ni2					25X13H2
106	S43110	14Cr17Ni2	1Cr17Ni2					14X17H2
107	S43120	17Cr16Ni2		S43100.431	SUS431	X17CrNi16-2	X17CrNi16-2,1.4057	—
108	S44070	68Cr17	7Cr17	S44002.440A	SUS440A	—	—	—
109	S44080	85Cr17	8Cr17	S44003.440B	SUS440B	—	—	—
110	S44096	108Cr17	11Cr17	S44004.440C	SUS440C	X105CrMo17	X105CrMo1,1.4125	—
111	S44097	Y108Cr17	Y11Cr17	S44020.440F	SUS440F	—	—	—
112	S44090	95Cr18	9Cr17	—	—	—	—	95X18
113	S45110	12Cr5Mo	1Cr5Mo	(S50200.502)	(STBA25)	(TS37)	—	15X5M
114	S45610	12Cr12Mo	1Cr12Mo	—	—	—	—	—
115	S45710	13Cr13Mo	1Cr13Mo	—	SUS410J1	—	—	—

续表

序号	中国 GB/T 20878—2007			美国 ASTM A959—2004	日本 JIS G4303—1998 JIS G4311—1991	国际 ISO/TS 15510:2003 ISO 4955:2005	欧洲 EN 10088:1—1995 EN 10095—1999 等	俄罗斯 ГОСТ 5632—1972
	统一数字代号	新牌号	旧牌号					
116	S45830	32Cr13Mo	3Cr13Mo	—	—	—	—	—
117	S45990	102Cr17Mo	9Cr18Mo	S44001.440C	SUS440C	X105CrMo17	X105CrMo17,1.4125	—
118	S46990	90Cr18MoV	9Cr18MoV	S44003.440B	SUS440B	—	X90CrMoV18,1.4112	—
119	S46010	14Cr11MoV	1Cr11MoV	—	—	—	—	15Х11МФ
120	S46110	158Cr12MoV	1Cr12MoV	—	—	—	—	—
121	S46020	21Cr12MoV	2Cr12MoV	—	—	—	—	—
122	S46250	18Cr12MoVNbN	2Cr12MoVNbN	—	SUH600	—	—	—
123	S47010	15Cr12WMoV	1Cr12WMoV	—	—	—	—	15Х12ВНМФ
124	S47220	22Cr12NiWMoV	2Cr12NiMoWV	(616)	SUH616	—	—	—
125	S47310	13Cr11Ni2W2MoV	1Cr11Ni2W2MoV	—	—	—	—	13Х11Н2В2МФ
126	S47410	14Cr12Ni2WMoVNb	1Cr12Ni2WMoVNb	—	—	—	—	13Х14Н3В2Ф
127	S47250	10Cr12Ni3Mo2VN		—	—			
128	S47450	18Cr11NiMoNbVN	2Cr11NiMoNbVN	—	—	—	—	—
129	S47710	13Cr14Ni3W2VB	1Cr14Ni3W2VB	—	—	—	—	15Х12Н2МВФАВ
130	S48040	42Cr9Si2	4Cr9Si2	—	—	—	—	40Х9С2
131	S48045	45Cr9Si3		—	SUH1	—	(X45CrSi3,1.4718)	—
132	S48140	40Cr10Si2Mo	4Cr10Si2Mo	—	SUH3	—	(X40CrSiMo10,1.4731)	40Х10С2М
133	S48380	80Cr20Si2Ni	8Cr20Si2Ni		SUH4		(X80CrSiNi20,1.4747)	—
134	S51380	04Cr13Ni8Mo2Al		S13800.XM-13	—	—	—	—
135	S51290	022Cr12Ni9Cu2NbTi		S45500.XM-16	—	—	—	08Х15Н5Д2Т
136	S51550	05Cr15Ni5Cu4Nb		S15500.XM-12	—	—	—	—
137	S51740	05Cr17Ni4Cu4Nb	0Cr17Ni4Cu4Nb	S17400.630	SUS630	X5CrNiCuNb16-4	X5CrNiCuNb16-4,1.4542	—

续表

序号	中国 GB/T 20878—2007			美国 ASTM A959—2004	日本 JIS G4303—1998 JIS G4311—1991	国际 ISO/TS 15510:2003 ISO 4955:2005	欧洲 EN 10088:1—1995 EN 10095—1999 等	俄罗斯 ГОСТ 5632—1972
	统一数字代号	新牌号	旧牌号					
138	S51770	07Cr17Ni7Al	0Cr17Ni7Al	S17700.631	SUS631	X7CrNi17-7	X7CrNi17-7,1.4568	09X17H7Ю
139	S51570	07Cr15Ni7Mo2Al	0Cr15Ni7Mo2Al	S15700.632	—	X8CrNiMoAl15-7-2	X8CrNiMoAl15-7-2,1.4532	—
140	S51240	07Cr12Ni4Mn5Mo3Al	0Cr12Ni4Mn5Mo3Al		—	—	—	—
141	S51750	09Cr17Ni5Mo3N		S35000.633	—	—	—	—
142	S51778	06Cr17Ni7AlTi		S17600.635	—	—	—	—
143	S51525	06Cr15Ni25-Ti2MoAlVB	0Cr15Ni25Ti2-MoAlVB	S66286.660	SUH660	(X6NiCrTiMoVB-25-15-2)	—	—

注：括号内牌号是在表头所列标准之外的牌号。

表 1-15　国内外主要不锈钢牌号对照[16]

类别	中国 GB	美国 ASTM		日本 JIS	德国 DIN	法国 NF	英国 BS
		AISI	UNS				
奥氏体型	12Cr17Mn6Ni5N (1Cr17Mn6Ni5N)	201	S20100	SUS201		Z12CMN17-07Az	
	1Cr18Mn8Ni5N	202	S20200	SUS202			284S16
	12Cr18Mn9Ni5N (1Cr18Mn10Ni5Mo3N)						
	12Cr17Ni7(1Cr17Ni7)	301	S30100	SUS301	X12CrNi7.7	Z12CN17-07	301S21
	12Cr18Ni9(1Cr18Ni9)	302	S30200	SUS302		Z10CN18-09	302S25,302S31
	Y12Cr18Ni9(Y1Cr18Ni9)	303	S30300	SUS303	X8CrNiS18.9	Z10CNF18-09	303S21,302S31

续表

类别	中国 GB	美国 ASTM		日本 JIS	德国 DIN	法国 NF	英国 BS
		AISI	UNS				
奥氏体型	Y12Cr18Ni9Se (Y1Cr18Ni9Se)	303Se	S30323	SUS303Se			303S41,303S44
	06Cr19Ni10 (0Cr18Ni9)	304	S30400	SUS304	X5CrNi18.10	Z6CN18-09	304S15,304S31
	022Cr19Ni10 (00Cr19Ni10)	304L	S30403	SUS304L	X2CrNi19.11	Z2CN18-10	304S11,304S12
	06Cr19Ni10N (0Cr19Ni9N)	304N	S30451	SUS304N1		Z5CN18-09Az	
	06Cr19Ni9NbN (0Cr19Ni10NbN)	XM21(ASTM)	S30452	SUS304N2			
	022Cr19Ni10N (00Cr18Ni10N)	304LN(ASTM)	S30453	SUS304LN	X2CrNi18.10	ZCN18-10Az	
	10Cr18Ni12 (1Cr18Ni12)	305	S30500	SUS305		Z8CN18-12	305S19
	06Cr23Ni13 (0Cr23Ni13)	309S	S30908	SUS309S		Z10CN24-13	
	06Cr25Ni20 (0Cr25Ni20)	310S	S31008	SUS310S		Z8CN25-20	310S24,310S31
	06Cr17Ni12Mo2 (0Cr17Ni12Mo2)	316	S31600	SUS316	X5CrNiMo17.12.02	Z7CND17-12-02 Z7CND17-11-02	316S16,316S31
	022Cr17Ni12Mo2 (00Cr17Ni14Mo2)	316L	S31603	SUS316L	X2CrNiMo18.14.3	Z3CND17-12-03 Z3CND18-14-03	316S12,316S13
	06Cr17Ni12Mo2N (0Cr17Ni12Mo2N)	316N	S31651	SUS316N			

续表

类别	中国 GB	美国 ASTM		日本 JIS	德国 DIN	法国 NF	英国 BS
		AISI	UNS				
奥氏体型	022Cr17Ni12Mo2N (00Cr17Ni13Mo2N)	316LN(ASTM)	S31653	SUS316LN	X2CrNiMoN17. 13. 3	Z3CND18-14-05Az Z3CND17-11Az	
	06Cr18Ni12Mo2Cu2 (0Cr18Ni12Mo2Cu2)			SUS316J1			
	06Cr19Ni13Mo3 (0Cr19Ni13Mo3)	317	S31700	SUS317	X5CrNiMo17. 13. 3		317S16
	022Cr19Ni13Mo3 (00Cr19Ni13Mo3)	317L	S31703	SUS317L	X5CrNiMo18. 16. 4	Z3CND18-14-03 Z3CND19-15-04	317S12
	06Cr17Ni12Mo3Ti (0Cr18Ni12Mo3Ti)	316Ti(ASTM)	S31635	SUS316Ti	X6CrNiMoTi17. 12. 2	Z6CNDT17-12	320S17
	03Cr18Ni16Mo5 (0Cr18Ni16Mo5)		S31725	SUS317J1			
	06Cr18Ni11Ti (0Cr18Ni10Ti)	321	S32100	SUS321	X6CrNiTi18. 10	Z6CNT18-10 Z6CNT18-12	321S12,321S31
	06Cr18Ni11Nb (0Cr18Ni11Nb)	347	S34700	SUS347	X6CrNiNb18. 10	Z6CNNb18-10 Z6CNNb18-12	347S17,347S31
	06Cr18Ni9Cu3 (0Cr18Ni9Cu3)			SUSXM7		Z3CNU18-10 Z3CNU18-09FF Z3CNU18-10FF	
	06Cr18Ni13Si4 (0Cr18Ni13Si4)			SUSXM15J1			
	12Cr18Ni9Si3 (1Cr18Ni9Si3)	302B	S30215				

续表

类别	中国 GB	美国 ASTM		日本 JIS	德国 DIN	法国 NF	英国 BS
		AISI	UNS				
奥氏体-铁素体型	14Cr18Ni11Si4AlTi (1Cr18Ni11Si4AlTi)						
	022Cr19Ni5Mo3Si2N (00Cr18Ni5Mo3Si2)						
	12Cr21Ni5Ti (1Cr21Ni5Ti)						
铁素体型	06Cr13Al(0Cr13Al)	405	S40500	SUS405	X6CrAl13	Z8CA12 Z6CA13	405S17
	022Cr12(00Cr12)			SUS410L		Z3C14	
	10Cr17(1Cr17)	430	S43000	SUS430	X6Cr17	Z8C17	430S15
	Y10Cr17(Y1Cr17)	430F	S43020	SUS430F	X14CrMoS17	Z8CF17 Z10CF17	
	10Cr17Mo(1Cr17Mo)	434	S43400	SUS434	Z6CrMo17.1	Z8CD17.01	434S17
	008Cr30Mo2 (00Cr30Mo2)			SUS447J1			
	008Cr27Mo (00Cr27Mo)	XM27(ASTM)	S44627	SUSXM27			
	10Cr15(1Cr15)	429	S42900	SUS429			
	022Cr18Ti (00Cr17)	XM8(ASTM)	S43035	SUS430LX			
	019Cr19Mo2NbTi (00Cr18Mo2)	18Cr2Mo(ASTM)	S44400	SUS444			

续表

类别	中国 GB	美国 ASTM		日本 JIS	德国 DIN	法国 NF	英国 BS
		AISI	UNS				
马氏体型	12Cr12(1Cr12)	403	S40300	SUS403			
	12Cr13(1Cr13)	410	S41000	SUS410	X12Cr13	Z12C13	410S21
	06Cr13(0Cr13)	410S(ASTM)	S41008	SUS410S	X6Cr13	Z6C13	403S17
	Y12Cr13(Y1Cr13)	416	S41600	SUS416		Z11CF13	416S21
	13Cr13Mo(1Cr13Mo)			SUS410J1			
	20Cr13(2Cr13)	420	S42000	SUS420J1	X20Cr13	Z20C13	420S29
	30Cr13(3Cr13)	420	S42000	SUS420J2	X30Cr13	Z30C13	420S45
	Y30Cr13(Y3Cr13)	420F	S42020	SUS420F		Z29CF13	
	32Cr13Mo(3Cr13Mo)						
	40Cr13(4Cr13)				X38Cr13	Z40C14CI	
	14Cr17Ni2(1Cr17Ni2)	431	S43100	SUS431	X20CrNi17.2	Z15CN16.02	431S29
	68Cr17(7Cr17)	440A	S44002	SUS440A			
	85Cr17(8Cr17)	440B	S44003	SUS440B			
	95Cr18(9Cr17)						
	108Cr17(11Cr17)	440C	S44004	SUS440C		Z100CD17CI	
	Y108Cr17(Y11Cr17)	440F(ASTM)	S44020	SUS440F			
	102Cr17Mo(9Cr18Mo)	440C	S44004	SUS440C		Z100CD17	
	90Cr18MoV (9Cr18MoV)						X89CrMoV18-1
	3Cr16			SUS429J1			
沉淀硬化型	05Cr17Ni4Cu4Nb (0Cr17Ni4Cu4Nb)	630(ASTM)	S17400	SUS630		Z7CNU16-04	
	07Cr17Ni7Al(0Cr17Ni7Al)	631(ASTM)	S17700	SUS631	X7CrNiAl17.7	Z9CNA17-07	
	07Cr15Ni7Mo2Al (0Cr15Ni7Mo2Al)	632	S15700			Z10CNDA15.07	

1.6 马氏体不锈钢、沉淀硬化不锈钢的热处理制度

表 1-16 马氏体不锈钢棒或试样的典型热处理制度[2]

序号	新牌号	旧牌号	钢棒的热处理制度	试样的热处理制度		标准代号
			退火	淬火	回火	
1	12Cr12	1Cr12	800～900℃缓冷或约750℃快冷	950～1000℃油冷	700～750℃快冷	①
2	06Cr13	0Cr13	800～900℃缓冷或约750℃快冷	950～1000℃油冷	700～750℃快冷	①
3	12Cr13	1Cr13	800～900℃缓冷或约750℃快冷	950～1000℃油冷	700～750℃快冷	①
4	Y12Cr13	Y1Cr13	800～900℃缓冷或约750℃快冷	950～1000℃油冷	700～750℃快冷	①
5	20Cr13	2Cr13	800～900℃缓冷或约750℃快冷	920～980℃油冷	600～750℃快冷	①
6	30Cr13	3Cr13	800～900℃缓冷或约750℃快冷	920～980℃油冷	600～750℃快冷	①
7	Y30Cr13	Y3Cr13	800～900℃缓冷或约750℃快冷	920～980℃油冷	600～750℃快冷	①
8	40Cr13	4Cr13	800～900℃缓冷或约750℃快冷	1050～1100℃油冷	200～300℃快冷	①
9	14Cr17Ni2	1Cr17Ni2	680～700℃高温回火，空冷	950～1050℃油冷	275～350℃空冷	①
10	17Cr16Ni2		680～800℃，炉冷或空冷	950～1050℃油冷或空冷	600～650℃，空冷	①
					750～800℃＋650～700℃②	①
11	68Cr17	7Cr17	800～920℃缓冷	1010～1070℃油冷	100～180℃快冷	①
12	85Cr17	8Cr17	800～920℃缓冷	1010～1070℃油冷	100～180℃快冷	①
13	108Cr17	11Cr17	800～920℃缓冷	1010～1070℃油冷	100～180℃快冷	①
14	Y108Cr17	Y11Cr17	800～920℃缓冷	1010～1070℃油冷	100～180℃快冷	①
15	95Cr18	9Cr18	800～920℃缓冷	1010～1070℃油冷	100～180℃快冷	①
16	13Cr13Mo	1Cr13Mo	830～900℃缓冷或约750℃快冷	970～1020℃油冷	650～750℃快冷	①
17	32Cr13Mo	3Cr13Mo	800～900℃缓冷或约750℃快冷	1025～1075℃油冷	200～300℃油冷、水冷、空冷	①
18	102Cr17Mo	9Cr18Mo	800～900℃缓冷	1000～1050℃油冷	200～300℃空冷	①
19	90Cr18MoV	9Cr18MoV	800～920℃缓冷	1050～1075℃油冷	100～200℃空冷	①

① GB/T 1220—2007《不锈钢棒》。

② 当镍含量在 GB/T 1200—2007 标准中表 4 规定的下限时，允许采用 620～720℃单回火制度。

表 1-17　沉淀硬化型不锈钢棒或试样的典型热处理制度[2]

序号	新牌号	旧牌号	热处理				标准代号
			种类		组别	条件	
1	05Cr15Ni5Cu4Nb		固溶处理		0	1020～1060℃，快冷	①
			沉淀硬化	480℃时效	1	经固溶处理后，470～490℃空冷	①
				550℃时效	2	经固溶处理后，540～560℃空冷	①
				580℃时效	3	经固溶处理后，570～590℃空冷	①
				620℃时效	4	经固溶处理后，610～630℃空冷	①
2	05Cr17Ni4Cu4Nb	0Cr17Ni4Cu4Nb	固溶处理		0	1020～1060℃，快冷	①
			沉淀硬化	480℃时效	1	经固溶处理后，470～490℃空冷	①
				550℃时效	2	经固溶处理后，540～560℃空冷	①
				580℃时效	3	经固溶处理后，570～590℃空冷	①
				620℃时效	4	经固溶处理后，610～630℃空冷	①
3	07Cr17Ni7Al	0Cr17Ni7Al	固溶处理		0	1000～1100℃，快冷	①
			沉淀硬化	510℃时效	1	经固溶处理后，950℃±10℃，保持 10min，空冷到室温，在 24h 内冷却到－73℃±6℃，保持 8h，再加热到 510℃±10℃，保持 1h 后，空冷	①
				565℃时效	2	经固溶处理后，于 760℃±15℃，空冷 90min，在 1h 内冷却到 15℃以下，保持 30min，再加热到 565℃±10℃，保持 90min，空冷	①
4	07Cr15Ni7Mo2Al	0Cr15Ni7Mo2Al	固溶处理		0	1000～1100℃，快冷	①
			沉淀硬化	510℃时效	1	经固溶处理后，950℃±10℃，保持 10min，空冷到室温，在 24h 内冷却到－73℃±6℃，保持 8h，再加热到 510℃±10℃，保持 1h 后，空冷	①
				565℃时效	2	经固溶处理后，于 760℃±15℃，空冷 90min，在 1h 内冷却到 15℃以下，保持 30min，再加热到 565℃±10℃，保持 90min，空冷	①

① GB/T 1220—2007《不锈钢棒》。

表 1-18 马氏体不锈钢板的典型热处理制度[3~5]

序号	新牌号	旧牌号	退火	淬火	回火	标准代号
1	12Cr12	1Cr12	约 750℃快冷，或 800～900℃缓冷			①、②、③
2	06Cr13	0Cr13	约 750℃快冷，或 800～900℃缓冷			①、②
3	12Cr13	1Cr13	约 750℃快冷，或 800～900℃缓冷			①、②、③
4	04Cr13Ni5Mo					①、②
5	20Cr13	2Cr13	约 750℃快冷，或 800～900℃缓冷			①、②
6	30Cr13	3Cr13	约 750℃快冷，或 800～900℃缓冷	980～1040℃快冷	150～400℃空冷	①、②
7	40Cr13	4Cr13	约 750℃快冷，或 800～900℃缓冷	1050～1100℃油冷	200～300℃空冷	①、②
8	17Cr16Ni2			1010℃±10℃油冷	605℃±5℃空冷	①、②
				1000～1030℃油冷	300～380℃空冷	①、②
9	68Cr17	7Cr17	约 750℃快冷，或 800～900℃缓冷	1010～1070℃快冷	150～400℃空冷	①、②
10	22Cr12NiMoWV	2Cr12NiMoWV	—			③

① GB/T 3280—2007《不锈钢冷轧钢板和钢带》。
② GB/T 4237—2007《不锈钢热轧钢板和钢带》。
③ GB/T 4238—2007《耐热钢钢板和钢带》。

表 1-19 沉淀硬化型不锈钢板的典型热处理制度[3~5]

序号	新牌号	旧牌号	热处理		标准代号
			固溶处理	沉淀硬化	
1	04Cr13Ni8Mo2Al		927℃±15℃，按要求冷却至 60℃以下	510℃±6℃，保温 4h，空冷	①、②
				538℃±6℃，保温 4h，空冷	①、②
2	022Cr12Ni9Cu2NbTi		829℃±15℃，水冷	480℃±6℃，保温 4h，空冷，或 510℃±6℃，保温 4h，空冷	①、②
3	05Cr17Ni4Cu4Nb	0Cr17Ni4Cu4Nb	1050℃±25℃，水冷	482℃±10℃，保温 1h，空冷 496℃±10℃，保温 4h，空冷 552℃±10℃，保温 4h，空冷 579℃±10℃，保温 4h，空冷 593℃±10℃，保温 4h，空冷 621℃±10℃，保温 4h，空冷 760℃±10℃，保温 2h，空冷 621℃±10℃，保温 4h，空冷	③

续表

序号	新牌号	旧牌号	热处理		标准代号
			固溶处理	沉淀硬化	
4	07Cr17Ni7Al	0Cr17Ni7Al	1065℃±15℃，水冷	954℃±8℃，保温 10min，快冷至室温，24h 内冷至－73℃±6℃，保温 8h，在空气中升温至室温，再加热到 510℃±6℃，保温 1h 后空冷	①、②
				960℃±8℃，保温 90min，1h 内冷至 15℃±3℃，保温 30min，再加热到 566℃±6℃，保温 90min 后空冷	①、②
				954℃±8℃，保温 10min，快冷至室温，24h 内冷至－73℃±6℃，保温不少于 8h，在空气中加温至室温，加热到 510℃±6℃，保温 1h，空冷	③
				760℃±15℃，保温 90min，1h 内冷至 15℃±3℃，保温≥30min，再加热到 510℃±6℃，保温 1h，空冷	③
5	07Cr15Ni7Mo2Al	0Cr17Ni7Al	1040℃±15℃，水冷	954℃±8℃保温 10min，快冷至室温，24h 内冷至－73℃±6℃，保温 8h，在空气中升温至室温。再加热到 510℃±6℃，保温 1h 后空冷	①、②
				760℃±15℃保温 90min，1h 内冷至 15℃±3℃，保温 30min，再加热到 566℃±6℃，保温 90min 后空冷	①、②
				954℃±8℃保温 10min，快冷至室温，24h 内冷至－73℃±6℃，保温不少于 8h，在空气中升温至室温。再加热到 510℃±6℃，保温 1h 后空冷	③
				760℃±15℃保温 90min，1h 内冷至 15℃±3℃，保温 30min，再加热到 566℃±6℃，保温 90min 后空冷	③
6	09Cr17Ni5Mo3N		930℃±15℃水冷，在－75℃以下保持 3h	455℃±8℃，保温 3h，空冷	①
				540℃±8℃，保温 3h，空冷	
			930℃±15℃水冷，在－75℃及以下保持 3h 以上	455℃±8℃，保温 3h，空冷	②
				540℃±8℃，保温 3h，空冷	
7	06Cr17Ni7AlTi		1038℃±15℃，空冷	510℃±8℃，保温 30min，空冷 538℃±8℃，保温 30min，空冷 566℃±8℃，保温 30min，空冷	①、②、③
8	06Cr15Ni25Ti2MoAlVB	06Cr15Ni25Ti2MoAlVB	885～915℃，快冷 或 965～995℃，快冷	700～766℃保温 16h，空冷或缓冷	③

① GB/T 3280—2007《不锈钢冷轧钢板和钢带》。
② GB/T 4237—2007《不锈钢热轧钢板和钢带》。
③ GB/T 4238—2007《耐热钢钢板和钢带》。

参 考 文 献

[1] 张其枢，堵耀庭．不锈钢焊接．北京：机械工业出版社，2000.
[2] GB/T 1220—2007. 不锈钢棒．
[3] GB/T 3280—2007. 不锈钢冷轧钢板和钢带．
[4] GB/T 4237—2007. 不锈钢热轧钢板和钢带．
[5] GB/T 4238—2007. 耐热钢钢板和钢带．
[6] NB/T 47010—2010. 承压设备用不锈钢和耐热钢锻件．
[7] GB 13296—2013. 锅炉、热交换器用不锈钢无缝钢管．
[8] GB 24511—2009. 承压设备用不锈钢钢板及钢带．
[9] GB/T 20878—2007. 不锈钢和耐热钢牌号及化学成分．
[10] GB 5310—2008. 高压锅炉用无缝钢管．
[11] GB 150.2—2011. 压力容器 第2部分：材料．
[12] 杜国华主编．实用工程材料焊接手册．北京：机械工业出版社，2004.
[13] GB/T 10123—2001. 金属和金属腐蚀基本术语和定义.
[14] 郑明新主编．工程材料. 北京：清华大学出版社．1983.
[15] [德] 福克哈德．不锈钢焊接冶金．栗卓新，朱学军译．北京：化学工业出版社，2004.
[16] 张少棠主编．钢铁材料手册：第5卷．北京：中国标准出版社，2001.

第2章 不锈钢焊接用焊接材料

本章主要介绍不锈钢焊接用的焊接材料（焊条、焊丝、焊剂）熔敷金属的化学成分、性能和用途；介绍不锈钢气体保护焊用气体的类别、技术指标和应用范围；介绍气体保护焊用的减压器、流量计、气体配比器的型号和技术数据以及钨极的种类、氩弧焊焊枪型号等。

2.1 不锈钢焊接用焊条

2.1.1 对不锈钢焊条的要求

不锈钢焊条除了要满足焊接工艺性能和焊接接头力学性能外，还要确保焊接接头具有一定的耐腐蚀性或耐热性或耐低温性。对药皮和焊芯，通常要考虑下列要求。

① 通过焊芯和药皮过渡各种合金元素，使焊缝金属化学成分和组织形态满足要求，以确保焊缝金属既有良好的力学性能，又有良好的抗相应介质腐蚀的能力。

② 通过焊芯或药皮，使焊缝金属中能渗入一定量的碳化物形成元素，如铌、钼、钛等，与碳形成稳定的碳化物，以阻止晶粒边界生成铬的碳化物。

③ 碳的增加，会促进奥氏体型不锈钢（或铁素体型不锈钢）焊缝产生晶间腐蚀。所以对焊芯和药皮的原材料中的含碳量要严加控制，建议采用低碳或超低碳的焊芯，使用低碳或无碳的铁合金和金属元素作为药皮的原材料，一般情况下，选焊条时熔敷金属含碳量不高于母材的含碳量。

④ 严格控制不锈钢焊芯和药皮中的硫、磷含量，以减少产生焊缝热裂纹的危险性。

2.1.2 不锈钢焊条的型号

焊条型号按熔敷金属化学成分、焊接位置和药皮类型等进行划分。药皮类型的简要说明参见表 2-3，不同标准之间的型号对照参见表 2-4。

焊条型号是国家标准中对焊条规定的编号，GB/T 983—2012《不锈钢焊条》根据焊条熔敷金属的化学成分、焊接位置和药皮类型、焊接电流种类规定了不锈钢焊条型号的编排方法（与美国焊接学会标准 AWS A5.4M:2006《耐蚀铬钢及铬镍钢焊条》焊条型号的编号方法类似）。不锈钢焊条型号及熔敷金属化学成分见表 2-1，焊条型号中的焊接位置、药皮类型和焊接电流种类的编号方法见表 2-2、表 2-3。不锈钢焊条的技术要求、性能指标、检验方法应符合 GB/T 983—2012《不锈钢焊条》标准的规定。用于承压特种设备的不锈钢焊条还应符合 NB/T 47018.2—2011（JB/T 4747）《承压设备用焊接材料订货技术条件　第 2 部分：钢焊条》的规定。

表 2-1 不锈钢焊条型号及熔敷金属化学成分[3]

焊条型号①	化学成分(质量分数)②/%									
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	其他
E209-××	0.06	4.0～7.0	1.00	0.04	0.03	20.5～24.0	9.5～12.0	1.5～3.0	0.75	N:0.10～0.30 V:0.10～0.30
E219-××	0.06	8.0～10.0	1.00	0.04	0.03	19.0～21.5	5.5～7.0	0.75	0.75	N:0.10～0.30
E240-××	0.06	10.5～13.5	1.00	0.04	0.03	17.0～19.0	4.0～6.0	0.75	0.75	N:0.10～0.30
E307-××	0.04～0.14	3.30～4.75	1.00	0.04	0.03	18.0～21.5	9.0～10.7	0.5～1.5	0.75	—
E308-××	0.08	0.5～2.5	1.00	0.04	0.03	18.0～21.0	9.0～11.0	0.75	0.75	—
E308H-××	0.04～0.08	0.5～2.5	1.00	0.04	0.03	18.0～21.0	9.0～11.0	0.75	0.75	—
E308L-××	0.04	0.5～2.5	1.00	0.04	0.03	18.0～21.0	9.0～12.0	0.75	0.75	—
E308Mo-××	0.08	0.5～2.5	1.00	0.04	0.03	18.0～21.0	9.0～12.0	2.0～3.0	0.75	—
E309L-××	0.04	0.5～2.5	1.00	0.04	0.03	22.0～25.0	12.0～14.0	0.75	0.75	—
E309-××	0.15	0.5～2.5	1.00	0.04	0.03	22.0～25.0	12.0～14.0	0.75	0.75	—
E309H-××	0.04～0.15	0.5～2.5	1.00	0.04	0.03	22.0～25.0	12.0～14.0	0.75	0.75	—
E309LNb-××	0.04	0.5～2.5	1.00	0.04	0.03	22.0～25.0	12.0～14.0	0.75	0.75	Nb+Ta: 0.70～1.00
E309Nb-××	0.12	0.5～2.5	1.00	0.04	0.03	22.0～25.0	12.0～14.0	0.75	0.75	Nb+Ta: 0.70～1.00
E309Mo-××	0.12	0.5～2.5	1.00	0.04	0.03	22.0～25.0	12.0～14.0	2.0～3.0	0.75	—
E309LMo-××	0.04	0.5～2.5	1.00	0.04	0.03	22.0～25.0	12.0～14.0	2.0～3.0	0.75	—
E310-××	0.08～0.20	1.0～2.5	0.75	0.03	0.03	25.0～28.0	20.0～22.5	0.75	0.75	—
E310H-××	0.35～0.45	1.0～2.5	0.75	0.03	0.03	25.0～28.0	20.0～22.5	0.75	0.75	—
E310Nb-××	0.12	1.0～2.5	0.75	0.03	0.03	25.0～28.0	20.0～22.0	0.75	0.75	Nb+Ta: 0.70～1.00
E310Mo-××	0.12	1.0～2.5	0.75	0.03	0.03	25.0～28.0	20.0～22.0	0.75	0.75	—
E312-××	0.15	0.5～2.5	1.00	0.04	0.03	28.0～32.0	8.0～10.5	0.75	0.75	—

续表

焊条型号[1]	化学成分(质量分数)[2]/%									
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	其他
E316-××	0.08	0.5～2.5	1.00	0.04	0.03	17.0～20.0	11.0～14.0	2.0～3.0	0.75	—
E316H-××	0.04～0.08	0.5～2.5	1.00	0.04	0.03	17.0～20.0	11.0～14.0	2.0～3.0	0.75	—
E316L-××	0.04	0.5～2.5	1.00	0.04	0.03	17.0～20.0	11.0～14.0	2.0～3.0	0.75	—
E316LCu-××	0.04	0.5～2.5	1.00	0.04	0.03	17.0～20.0	11.0～16.0	1.20～2.75	1.00～2.50	—
E316LMn-××	0.04	5.0～8.0	0.90	0.04	0.03	18.0～21.0	15.0～18.0	2.5～3.5	0.75	N:0.10～0.25
E317-××	0.08	0.5～2.5	1.00	0.04	0.03	18.0～21.0	12.0～14.0	3.0～4.0	0.75	—
E317L-××	0.04	0.5～2.5	1.00	0.04	0.03	18.0～21.0	12.0～14.0	3.0～4.0	0.75	—
E317MoCu-××	0.08	0.5～2.5	0.90	0.035	0.03	18.0～21.0	12.0～14.0	2.0～2.5	2	—
E317LMoCu-××	0.04	0.5～2.5	0.90	0.035	0.03	18.0～21.0	12.0～14.0	2.0～2.5	2	—
E318-××	0.08	0.5～2.5	1.00	0.04	0.03	17.0～20.0	11.0～14.0	2.0～3.0	0.75	Nb+Ta:6C～1.00
E318V-××	0.08	0.5～2.5	1.00	0.035	0.03	17.0～20.0	11.0～14.0	2.0～2.5	0.75	V:0.30～0.70
E320-××	0.07	0.5～2.5	0.60	0.04	0.03	19.0～21.0	32.0～36.0	2.0～3.0	3.0～4.0	Nb+Ta:8C～1.00
E320LR-××	0.03	1.5～2.5	0.30	0.020	0.015	19.0～21.0	32.0～36.0	2.0～3.0	3.0～4.0	Nb+Ta:8C～0.40
E330-××	0.18～0.25	1.0～2.5	1.00	0.04	0.03	14.0～17.0	33.0～37.0	0.75	0.75	—
E330H-××	0.35～0.45	1.0～2.5	1.00	0.04	0.03	14.0～17.0	33.0～37.0	0.75	0.75	—
E330MoMnWNb-××	0.20	3.5	0.70	0.035	0.03	15.0～17.0	33.0～37.0	2.0～3.0	0.75	Nb:1.0～2.00 W:2.0～3.00
E347-××	0.08	0.5～2.5	1.00	0.04	0.03	18.0～21.0	9.0～11.0	0.75	0.75	Nb+Ta:8C～1.00
E347L-××	0.04	0.5～2.5	1.00	0.04	0.03	18.0～21.0	9.0～11.0	0.75	0.75	Nb+Ta: 8C～1.00

续表

焊条型号①	化学成分(质量分数)②/%									
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	其他
E349-××	0.13	0.5～2.5	1.00	0.04	0.03	18.0～21.0	8.0～10.0	0.35～0.65	0.75	Nb+Ta:0.75～1.20 V:0.10～0.30 Ti≤0.15 W:1.25～1.75
E383-××	0.03	0.5～2.5	0.90	0.02	0.02	26.5～29.0	30.0～33.0	3.2～4.2	0.6～1.5	—
E385-××	0.03	1.0～2.5	0.90	0.03	0.02	19.5～21.5	24.0～26.0	4.2～5.2	1.2～2.0	—
E409Nb-××	0.12	1.00	1.00	0.04	0.030	11.0～14.0	0.60	0.75	0.75	Nb+Ta:0.75～1.50
E410-××	0.12	1.0	0.90	0.04	0.03		0.70	0.75	0.75	—
E410NiMo-××	0.06	1.0	0.90	0.04	0.03	11.0～12.5	4.0～5.0	0.40～0.70	0.75	—
E430-××	0.10	1.0	0.90	0.04	0.03	15.0～18.0	0.6	0.75	0.75	—
E430Nb-××	0.10	1.00	1.00	0.040	0.030	15.0～18.0	0.6	0.75	0.75	Nb+Ta:0.75～1.50
E630-××	0.05	0.25～0.75	0.75	0.04	0.03	16.0～16.75	4.5～5.0	0.75	3.25～4.00	Nb+Ta:0.15～0.30
E16-8-2-××	0.10	0.5～2.5	0.60	0.03	0.03	14.5～16.5	7.5～9.5	1.0～2.0	0.75	—
E16-25MoN-××	0.12	0.5～2.5	0.90	0.035	0.030	14.0～18.0	22.0～27.0	5.0～7.0	0.75	N≥0.1
E2209-××	0.04	0.5～2.0	1.00	0.04	0.03	21.5～23.5	7.5～10.5	2.5～3.5	0.75	N:0.08～0.20
E2553-××	0.06	0.5～1.5	1.0	0.04	0.03	24.0～27.0	6.5～8.5	2.9～3.9	1.5～2.5	N:0.10～0.25
E2593-××	0.04	0.5～1.5	1.0	0.04	0.03	24.0～27.0	8.5～10.5	2.9～3.9	1.5～3.0	N:0.08～0.25
E2594-××	0.04	0.5～2.0	1.0	0.04	0.03	24.0～27.0	8.0～10.5	3.5～4.5	0.75	N:0.20～0.30
E2595-××	0.04	2.5	1.2	0.03	0.025	24.0～27.0	8.0～10.5	2.5～4.5	0.75	N:0.20～0.30 W:0.4～1.0
E3155-××	0.10	1.0～2.5	1.00	0.04	0.03	20.0～22.5	19.0～21.0	2.5～3.5	0.75	Nb+Ta: 0.75～1.25 Co:18.5～21.0 W:2.0～3.0
E33-31-××	0.03	2.5～4.0	0.9	0.02	0.01	31.0～35.0	30.0～32.0	1.0～2.0	0.4～0.8	N:0.3～0.5

① 焊条型号中-××表示焊接位置和药皮类型，见表 2-2 和表 2-3。

② 化学分析应按表中规定的元素进行分析。如果在分析过程中发现其他化学成分，则应进一步分析这些元素的含量，除铁外，不应超过 0.5%。

注：1. 表中单值均为最大值。

2. 焊条型号中的字母 L 表示碳含量较低，H 表示碳含量较高，R 表示碳、磷、硅含量较低。

表 2-2　焊条型号中表示焊接位置代号的含义[3]

代号	焊接位置
-1	PA、PB、PD、PF
-2	PA、PB
-4	PA、PB、PD、PF、PG

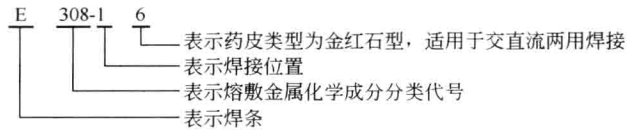
注：焊接位置见 GB/T 16672，其中 PA＝平焊、PB＝平角焊、PD＝仰角焊、PF＝向上立焊、PG＝向下立焊。

表 2-3　焊条型号中表示药皮类型、电流类型代号的含义[3]

代号	药皮类型	电流类型
5	碱性	直流
6	金红石型	交流和直流①
7	钛酸型	交流和直流②

① 46 型采用直流焊接。
② 47 型采用直流焊接。

不锈钢焊条型号中的字母“E”表示焊条，“E”后面的数字表示熔敷金属化学成分分类代号，如果特殊要求的化学成分用元素符号表示，放在数字的后面。短画“-”后面两位数字表示焊条药皮类型、焊接位置及焊接电流种类。不锈钢焊条编号含义见示例：



GB/T 983—2012《不锈钢焊条》与其他相关标准的焊条型号之间的对应关系见表 2-4。

不锈钢焊条熔敷金属的力学性能和主要用途见表 2-5、表 2-6。

2.1.3　不锈钢焊条牌号

不锈钢焊条牌号是指制造商对作为产品出厂的每种焊条标识的特定编号，用来区别不同焊条熔敷金属的化学成分、力学性能、药皮类型和焊接电流种类。其表示方法如下。

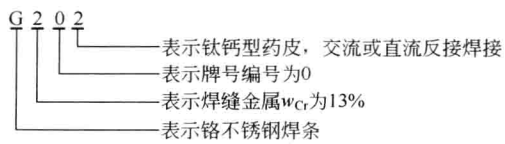
① 字母“G”表示铬不锈钢焊条；字母“A”表示奥氏体不锈钢焊条（或铬镍不锈钢焊条）。

② 字母“G”或字母“A”后面第一位数字，表示焊缝金属的主要化学成分，其编排规则见表 2-7 的规定。

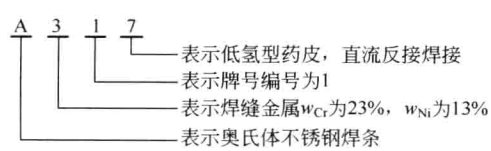
③ 字母“G”或字母“A”后面的第二位数字，表示同一焊缝主要化学成分组成等级中的不同牌号，对同一药皮类型的焊条，可有 10 个牌号，按 0、1、2、3、…、8、9 顺序排列。

④ 字母“G”或字母“A”后面的第三位数字，表示药皮类型和焊接电源种类。不锈钢焊条牌号只应用“2”和“7”两个数字。数字“2”表示钛钙型焊条，交流或直流反接电源焊接；数字“7”表示低氢型焊条（又称碱性焊条），只限于直流反接电源焊接。

举例1：



举例2：



2.1.4 不锈钢焊条主要用途

不锈钢焊条牌号及其符合或相当于 GB/T 983—2012、AWS A5.4M:2006 标准规定的焊条型号，其熔敷金属主要化学成分及主要用途见表 2-6。国内外不锈钢焊条对照见表 2-4。

表 2-4 国内外不锈钢焊条型号对照[3]

GB/T 983—2012	ISO 3581:2003	AWS A5.4M:2006	GB/T 983—1995
E209-××	ES209-××	E209-××	E209-××
E219-××	ES219-××	E219-××	E219-××
E240-××	ES240-××	E240-××	E240-××
E307-××	ES307-××	E307-××	E307-××
E308-××	ES308-××	E308-××	E308-××
E308H-××	ES308H-××	E308H-××	E308H-××
E308L-××	ES308L-××	E308L-××	E308L-××
E308Mo-××	ES308Mo-××	E308Mo-××	E308Mo-××
E308LMo-××	ES308LMo-××	E308LMo-××	E308MoL-××
E309L-××	ES309L-××	E309L-××	E309L-××
E309-××	ES309-××	E309-××	E309-××
E309H-××	—	E309H-××	—
E309LNb-××	ES309LNb-××	—	—
E309Nb-××	ES309Nb-××	E309Nb-××	E309Nb-××
E309Mo-××	ES309Mo-××	E309Mo-××	E309Mo-××
E309LMo-××	ES309LMo-××	E309LMo-××	E309MoL-××
E310-××	ES310-××	E310-××	E310-××
E310H-××	ES310H-××	E310H-××	E310H-××
E310Nb-××	ES310Nb-××	E310NV××	E310Nb-××
E310Mo-××	ES310Mo-××	E310Mo-××	E310Mo-××
E312-××	ES312-××	E312-××	E312-××
E316-××	ES316-××	E316-××	E316-××
E316H-××	ES316H-××	E316H-××	E316H-××
E316L-××	ES316L-××	E316L-××	E316L-××
E316LCu-××	ES316LCu-××	—	—
E316LMn-××	—	E316LMn-××	—
E317-××	ES317-××	E317-××	E317-××
E317L-××	ES317L-××	E317L-××	E317L-××
E317MoCu-××	—	—	E317MoCu-××
E317LMoCu-××	—	—	E317MoCuL-××
E318-××	ES318-××	E318-××	E318-××
E318V-××	—	—	E318V-××
E320-××	ES320-××	E320-××	E320-××

续表

GB/T 983—2012	ISO 3581:2003	AWS A5.4M:2006	GB/T 983—1995
E320LR-××	ES320LR-××	E320LR-××	E320LR-××
E330-××	ES330-××	E330-××	E330-××
E330H-××	ES330H-××	E330H-××	E330H-××
E330MoMnWNb-××	—	—	E330MoMnWNb-××
E347-××	ES347-××	E347-××	E347-××
E347L-××	ES347L-××	—	—
E349-××	ES349-××	E349-××	E349-××
E383-××	ES383-××	E383-××	E383-××
E385-××	ES385-××	E385-××	E385-××
E409Nb-××	ES409Nb-××	E409Nb-××	—
E410-××	ES410-××	E410-××	E410-××
E410NiMo-××	ES410NiMo-××	E410NiMo-××	E410NiMo-××
E430-××	ES430-××	E430-××	E430-××
E430Nb-××	ES430Nb-××	E430N-××	—
E630-××	ES630-××	E630-××	E630-××
E16-8-2-××	ES16-8-2-××	E16-8-2-××	E16-8-2-××
E16-25MoN-××	—	—	E16-25MoN-××
E2209-××	ES2209-××	E2209-××	E2209-××
E2553-××	ES2553-××	E2553-××	E2553-××
E2593-××	ES2593-××	E2593-××	—
E2594-××	—	E2594-××	—
E2595-××	—	E2595-××	—
E3155-××	—	E3155-××	—
E33-31-××	—	E33-31-××	—

表 2-5　不锈钢焊条熔敷金属的力学性能和主要用途[2,3,5]

焊条型号	抗拉强度 R_m/MPa	断后伸长率 A/%	热处理	焊条用途及熔敷金属的性能
E209-××	690	15	—	通常用于焊接相同类型的不锈钢，也可以用于异种钢的焊接，如低碳钢和不锈钢，还可以直接在低碳钢上堆焊以防腐蚀
E219-××	620	15	—	通常用于焊接相同类型的不锈钢，也可以用于异种钢的焊接，如低碳钢和不锈钢，还可以直接在低碳钢上堆焊以防腐蚀
E240-××	690	25	—	通常用于焊接相同类型的不锈钢，也可以用于异种钢的焊接，如低碳钢和不锈钢，还可以直接在低碳钢上堆焊以防腐蚀和耐磨损
E307-××	590	25	—	通常用于异种钢的焊接，如奥氏体锰钢与碳钢锻件或铸件的焊接，焊缝强度中等，具有良好的抗裂性

续表

焊条型号	抗拉强度 R_m/MPa	断后伸长率 A/%	热处理	焊条用途及熔敷金属的性能
E308-××	550	30	—	通常用于焊接工作温度低于 300℃的不锈钢，如 06Cr19Ni10、06Cr18Ni11Ti
E308H-××	550	30	—	除含碳量限制在上限外，熔敷金属合金元素含量与 E308 相同，由于含碳量高，在高温下具有较高的抗拉强度和蠕变强度
E308L-××	510	30	—	除含碳量低外，熔敷金属合金元素含量与 E308 相同。由于含碳量低，在不含铌、钛等稳定剂时，也能抵抗因碳化物析出而产生的晶间腐蚀。但与铌稳定化的焊缝相比，其高温强度较低，用于焊接超低碳 Cr19Ni10 不锈钢，也可用于 06Cr18Ni11Ti 工作温度低于 300℃耐腐蚀的不锈钢结构；主要用于合成纤维、化肥、石油等设备的制造
E308Mo-××	550	30	—	除钼含量较高外，熔敷金属合金元素含量与 E308 相同。通常用于焊接相同类型的不锈钢。当希望熔敷金属中铁素体含量超过 E316 型焊条时，也可以用于 Cr18Ni12Mo 型不锈钢锻件的焊接
E308LMo-××	520	30	—	用于焊接超低碳不锈钢结构，也可以用于 06Cr18Ni11Ti 与碳素钢的焊接
E309-××	550	25	—	通常用于焊接 Cr23Ni13 型的不锈钢，也可以用于焊接在强腐蚀介质中使用的要求焊缝合金元素含量较高的不锈钢或用于异种钢的焊接，如 Cr19Ni9 型不锈钢与碳钢的焊接
E309L-××	510	25	—	除含碳量较低外，熔敷金属合金元素含量与 E309 相同。由于含碳量低，因此在不含铌、钛等稳定剂时，也能抵抗因碳化物析出而产生的晶间腐蚀。但与铌稳定化的焊缝相比，其高温强度较低。用于合成纤维、石油化工等设备中 Cr23Ni10 型不锈钢的焊接，也可用于核反应堆压力容器内壁过渡层堆焊和塔内构件焊接
E309H-××	550	25	—	控制含碳量下限外，其余合金元素与E309-××相同，碳含量的限制使该焊条熔敷金属(约 6FN 的铁素体含量)在高温下具有较高的抗拉强度和蠕变强度，适用于要求接头具有高抗腐蚀性和高抗氧化性的 Cr24Ni12 的锻件或铸件的焊接。
E309Nb-××	550	25	—	除含碳量较低并加入铌以外，熔敷金属合金元素含量与 E309 相同，铌使焊缝金属的抗晶间腐蚀能力和高温强度提高。通常用于 06Cr18Ni11Nb(0Cr18Ni11Nb)型复合钢板的焊接或在碳钢上堆焊
E309LNb-××	510	25	—	含碳量较低，其余合金元素与 E309Nb-××相同，耐晶间腐蚀性更好

续表

焊条型号	抗拉强度 R_m/MPa	断后伸长率 A/%	热处理	焊条用途及熔敷金属的性能
E309Mo-××	550	25	—	除含碳量较低并加入钼外，熔敷金属中的合金元素含量与 E309 相同。用于焊接耐硫酸介质(硫胺)腐蚀的 Cr23Ni13 型不锈钢，也可焊接不锈钢衬里、复合钢、异种钢
E309LMo-××	510	25	—	熔敷金属合金元素含量除含碳最低以外与 E309Mo 相同。熔敷金属含碳量低，因此焊缝抗晶间腐蚀能力较强，用于焊接超低碳 Cr23Ni13Mo2 不锈钢(如尿素合成塔衬里及异种钢焊接等)
E310-××	550	25	—	熔敷金属在 900～1100℃高温下具有良好的抗氧化性能。用于高温条件下焊接 Cr25Ni21 型耐热不锈钢、不锈钢衬里，也可用于硬化性大的铬钢(如 Cr5Mo、Cr9Mo、Cr13 及 Cr28 等)以及异种钢的焊接
E310H-××	620	8	—	除含碳量较高外，熔敷金属合金元素的含量与 E310 相同。通常用于相同类型的耐热、耐腐蚀不锈钢铸件的焊接和补焊。不宜在高硫气氛中或者有剧烈热冲击条件下使用，因为在 820～870℃下长时间停留时，可促使形成 σ 相和二次碳化物，降低耐腐蚀性能和韧性。专用于焊接 HK40 耐热钢
E310Nb-××	550	23	—	除降低含碳量并加入铌外，熔敷金属合金元素含量与 E310 相同。通常用于焊接耐热的铸件，06Cr18Ni11Nb(0Cr18Ni11Nb)型复合钢板的焊接或在碳钢板上堆焊
E310Mo-××	550	28	—	除降低含碳量并加入钼外，熔敷金属合金元素含量与 E310 相同。常用于耐热铸件、06Cr17Ni12Mo2(0Cr17Ni12Mo2)型复合钢板的焊接，或在碳钢上堆焊
E312-××	660	15	—	焊缝金属为奥氏体基体上与分布其上的大量铁素体构成的双相组织，即使在被大量奥氏体形成元素所稀释时仍保持双相组织，因此具有较高的抗裂性能和耐腐蚀性能，尤其耐应力腐蚀性能较为突出。用于 29-9 系不锈钢喷气发动机部件等耐热钢材料的焊接，以及各种堆焊、易开裂、易产生气孔的材料焊接。特别适用于 16%Cr-25%Ni-6%Mo 耐热钢与中碳 Cr-Mo 钢焊接，不宜在 420℃以下温度使用，以避免二次脆化相的形成
E316-××	520	25	—	通常用于焊接 06Cr17Ni12Mo2(0Cr17Ni12Mo2)型不锈钢及相类似的合金。由于钼提高了焊缝的抗蠕变能力，因此也可以用于焊接在较高温度下使用的不锈钢。当焊缝金属存在连续或非连续网状铁素体和焊缝金属的铬钼比小于一定值，并且焊缝金属处在腐蚀介质中时，焊缝金属可能会发生快速腐蚀
E316H-××	520	25	—	除碳含量限制在上限外，熔敷金属合金元素含量与 E316 相同。由于含碳量较高，在高温下具有较高的抗拉强度和蠕变强度

续表

焊条型号	抗拉强度 R_m/MPa	断后伸长率 A/%	热处理	焊条用途及熔敷金属的性能
E316L-××	490	25	—	除含碳量较低外，熔敷金属合金元素含量与E316相同，由于含碳量低，因此在不含铌、钛等稳定剂时，也能抵抗因碳化物析出而产生的晶间腐蚀。当焊缝金属碳量限制在0.04%以下时，在绝大多数情况下都可以防止晶间腐蚀。高温强度不如E316H型焊条。用于焊接超低碳Cr18Ni12Mo2不锈钢（如尿素、合成纤维设备），也可用于焊接焊后不能进行热处理的铬不锈钢及复合钢和异种钢等
E316LCu-××	510	25	—	含铜量较高，其余合金元素与E316L-××相同，耐腐蚀性更好
E316LMn-××	550	15	—	含锰量较高，其余合金元素与E316L-××相比，Cr、Ni、Mo等元素含量均增加（焊缝金属的名义成分是19.5Cr，16.5Ni，6.5Mn，3Mo，0.2N）。此焊条的基本用途之一是用来焊接−269℃相似或不相似的低温钢。相似的钢包括诸如不锈钢UNS S30453（相当于中国的022Cr19Ni10N）和S31653（相当于中国的022Cr17Ni12Mo2N）。此焊条在酸和海水里也表现出很好的抗腐蚀性能，特别适合于尿素合成厂的腐蚀工况。它也是无磁性的。合金中的锰含量对于稳定奥氏体微结构和辅助热裂纹抗力有帮助
E317-××	550	20	—	熔敷金属中合金元素含量（特别是钼）略高于E316焊条，通常用于焊接相同类型的不锈钢，可在强腐蚀条件下使用
E317L-××	510	20	—	除含碳量较低外，熔敷金属中合金元素的含量与E317相同。由于含碳量低，因此在不含铌、钛等稳定剂时，也能抵抗因碳化物析出而产生的晶间腐蚀，焊缝强度不如E317型焊条。通常用于焊接超低碳的06Cr19Ni13Mo3、022Cr19Ni13Mo3不锈钢，还适用于复合钢、异种钢焊接及堆焊耐蚀层
E317MoCu-××	540	25	—	熔敷金属中含铜量较高，因此具有较高的耐腐蚀性能。通常用于焊接相同类型的含铜不锈钢
E317LMoCu-××	540	25	—	熔敷金属中含钼量较高并且有铜，因此在硫酸介质中具有较高的耐腐蚀能力。通常用于焊接合成纤维等设备，及在稀、中浓度硫酸介质中工作的Cr19Ni13Mo2Cu型超低碳不锈钢的焊接，也可焊接Cr10Si3耐酸钢
E318-××	550	20	—	除加铌外，熔敷金属中合金元素含量与E316相近，铌提高了焊缝金属耐晶间腐蚀能力。用于重要的06Cr17Ni12Mo2、Cr17Ni14Mo2等不锈钢结构的焊接，如尿素合成塔、维尼纶设备等接触强腐蚀介质的部件
E318V-××	540	25	—	除加钒外，熔敷金属中合金元素与E316相近，钒提高了焊缝金属热强性和抗腐蚀能力。可焊接一般耐热及要求一定耐蚀的Cr19Ni10及06Cr17Ni12Mo2不锈钢

续表

焊条型号	抗拉强度 R_m/MPa	断后伸长率 A/%	热处理	焊条用途及熔敷金属的性能
E320-××	550	28	—	熔敷金属具有优异的抗腐蚀性和较强的抗氧化能力。在化工、石油和制氢设备等制造中广泛应用。用于硫酸、硝酸、磷酸和氧化性酸腐蚀介质中 Carpenter20Cb 镍合金的焊接等。还可用于异种钢的焊接
E320LR-××	520	28	—	除碳、硅、硫、磷的含量较低外，熔敷金属合金元素含量与 E320 相同，并且铌和锰含量控制在很窄的范围内。这种改变减少在纯奥氏体不锈钢焊缝金属中经常出现的微裂纹(同时保持抗腐蚀性能)。常用于为获得含有铁素体的奥氏体不锈钢的焊接。焊缝强度比 E320 型焊条低。对硫酸、磷酸及氟酸具有较好的耐腐蚀性能。用于 20Cb3 钢的焊接及低碳钢与 20Cb3 钢的焊接
E330-××	520	23	—	通常用于焊接在 980℃以上工作的、要求具有耐热性能的设备，并广泛用于相同类型的不锈钢铸件的补焊及铸造合金与锻造合金的焊接
E330H-××	620	8	—	除含碳量较高外，熔敷金属合金元素与 E330 相同。常用于相同类型的耐热及耐腐蚀高合金铸件的焊接和补焊
E330Mo-MnWNb-××	590	25	—	除加入钨、铌及较高的锰、钼外，熔敷金属中合金元素含量与 E330 相同。通常用于在 850～900℃高温下工作的同类型不锈钢材料的焊接以及制氢转化炉中集合管和膨胀管(如 Cr20Ni32 和 Cr18Ni37 型不锈钢)的焊接
E347-××	520	25	—	用铌或铌加钽作稳定剂，提高抗晶间腐蚀的能力。常用于焊接以铌或钛作稳定剂、成分相近的铬镍合金。用于焊接重要的耐腐蚀、含钛稳定的 07Cr19Ni11Ti 不锈钢
E347L-××	510	25	—	含碳量较低，其余合金元素与 E347-×× 相同，耐晶间腐蚀性更好
E349-××	690	23	—	熔敷金属加入钼、钨及铌后，使焊缝金属具有良好的高温强度。熔敷金属中的铁素体含量较高，有助于提高焊缝的抗裂性能，常用于焊接相同类型的不锈钢
E383-××	520	28	—	通常用于焊接与其成分相近的母材和其他类型不锈钢。E383 型焊缝金属可在硫酸和磷酸介质中应用。由于碳、硫和磷的含量低，可减少焊缝金属热裂纹和常在奥氏体不锈钢焊缝金属中产生的裂纹
E385-××	520	28	—	通常用于焊接在硫酸和一些含有氯化物介质中使用的不锈钢，当要求改善在某些介质中的耐腐蚀性能时，也可用于焊接 022Cr19Ni13Mo3(00Cr19Ni13Mo3)型不锈钢。由于碳、硅、硫、磷的含量低，可减少焊缝金属热裂纹和常在奥氏体不锈钢焊缝金属中产生的裂纹

续表

焊条型号	抗拉强度 R_m/MPa	断后伸长率 A/%	热处理	焊条用途及熔敷金属的性能
E409Nb-××	450	13	①	含有少量的元素 Nb(铌的加入产生铁素体结构和细化晶粒),其余合金元素与 E410-××相同。其焊缝金属的化学成分和用 E410 焊条焊出的焊缝非常相似。该型号焊条用于焊接诸如 405 型和 409 型的铁素体不锈钢。也可用于焊接 410 型复合不锈钢时作为第二层和(或)附加层,以及用于碳钢和低合金钢的覆盖层。若需要获得有很好韧性的焊缝,则需要进行预热和焊后热处理。采用该型号的焊条不能用来提高诸如 410 型完全硬化马氏体不锈钢的强度和硬度
E410-××	450	15	②	焊接接头属于空气淬硬型材料,因此焊接时需要进行预热和后热处理,以获得良好的塑性。通常用于焊接相同类型的不锈钢,如 410、410S 和 405 等材料,也用于在碳钢上堆焊,以提高抗腐蚀和擦伤的能力
E410NiMo-××	760	10	③	马氏体不锈钢焊条,与 E410 型焊条相比,熔敷金属中镍含量较高,以限制焊缝组织中的铁素体含量,减少对力学性能的有害影响,焊缝的焊后热处理温度不应超过 620℃,温度过高时,可能使焊缝组织中未回火的马氏体在冷却到室温后重新淬硬。主要用于 0Cr13Ni4Mo 铸钢件的补焊和水电站过流部件汽蚀磨损后的堆焊修复以及同材质结构件的焊接
E430-××	450	15	①	熔敷金属中含铬量较高,在通常使用条件下,具有优良的耐腐蚀性能,在热处理后又获得足够的塑性。焊接时,通常需要进行预热和后热处理。只有经过热处理后,焊接接头才能获得理想的力学性能和抗腐蚀能力。用于焊接耐蚀(硝酸)、耐热的 Cr17 不锈钢结构
E430Nb-××	450	13	①	含有少量的稳定化元素 Nb,其余合金元素与 E430-××相同。耐晶间腐蚀性更好
E630-××	930	6	④	通常用于焊接 Cr16Ni4 型沉淀硬化不锈钢。熔敷金属化学成分限制了马氏体组织中网状铁素体的存在,减少了对力学性能的不利影响。根据使用条件和焊接接头的尺寸不同,焊缝可在焊后经沉淀硬化处理或经固溶和沉淀硬化处理,也可在焊后状态下使用

续表

焊条型号	抗拉强度 R_m/MPa	断后伸长率 A/%	热处理	焊条用途及熔敷金属的性能
E16-18-2-××	520	25	—	通常用于焊接高温、高压不锈钢管路，熔敷金属铁素体含量一般在 5FN 以下。焊缝具有良好的热塑性能，即使在较大的拘束条件下，仍具有较强的抗裂能力，并且不论在焊后状态下还是在固熔处理后都具有较好的性能，腐蚀试验表明 E16-8-2 型焊条的耐腐蚀性能稍差于 06Cr17Ni12Mo2(0Cr17Ni12Mo2)型不锈钢。当焊缝在强腐蚀介质中工作时，与介质相接触的焊道应使用更抗腐蚀的焊条进行焊接
E16-25MoN-××	610	30	—	通常用于焊接淬火状态下的低合金钢、中合金钢、刚度较大的结构件及相同类型的耐热钢等，如用于淬火状态下的 30CrMnSi 钢。也可用于异种金属的焊接，如不锈钢与碳钢的焊接
E2209-××	690	15	—	通常用于焊接含铬量约为 22% 的双相不锈钢。熔敷金属的显微组织为奥氏体-铁素体基体的双相结构。使焊缝金属的强度增加，并能提高抗点腐蚀性能和应力腐蚀开裂的能力。主要用于石化、水工行业同类型的超低碳不锈钢材料的焊接，如 022Cr22Ni5Mo3N
E2553-××	760	13	—	焊缝金属的显微组织为奥氏体-铁素体基体的双相结构，增加了焊缝金属的强度，并能提高抗点腐蚀性能和应力腐蚀开裂的能力。通常用于焊接含铬量约为 25% 的双相不锈钢。如 022Cr22Ni5Mo4N、03Cr25Ni6Mo3Cu2N、UNS 32550(Alloy255)等
E2593-××	760	13	—	焊缝金属的显微组织为奥氏体-铁素体基体的双相结构，增加了焊缝金属的强度，并能提高抗点腐蚀性能和应力腐蚀开裂的能力，如果要求焊后退火处理，这种焊缝金属将比 E2253 类别或双相不锈钢母材的退火热处理温度高。主要用于海洋石油、天然气、石化行业含铬量约为 25% 的双相不锈钢的焊接，如 03Cr25Ni6Mo3Cu2N 等
E2594-××	760	13	—	熔敷金属具有良好的抗热裂性能，良好的耐点腐蚀和应力腐蚀开裂性能。主要用于海洋石油、天然气、石化行业含铬量约为 25% 的双相不锈钢的焊接，如 00Cr25Ni7Mo4N 等
E2595-××	760	13	—	熔敷金属具有良好的抗热裂性能，良好的耐点腐蚀和应力腐蚀开裂性能。主要用于海洋石油、天然气、石化行业含铬量约为 25% 的双相不锈钢的焊接，如 S32550、S32750、S32760 等

续表

焊条型号	抗拉强度 R_m/MPa	断后伸长率 A/%	热处理	焊条用途及熔敷金属的性能
E3155-××	690	15	—	这种焊材主要用来焊接成分相似或成分不相似材料制造的焊接部件，尤其是要求焊接区具有不低于母材的抗腐蚀和耐热性能。它用于航天产品，包括尾管和尾锥体、加力燃烧室部件、排气管、燃烧室、涡流机叶片、铲斗和喷嘴。它的高温性能是固有的，并不依靠时效硬化
E33-31-××	720	20	—	这种填充材料用于镍铬合金(UNS R20033)和它本身以及碳钢之间的焊接。这种合金的ASTM标准是B625，B649，B366，B472，B564，B619，B622和B626。这种焊条一般用于平焊

① 加热到760～790℃，保温2h，以不高于55℃/h的速度炉冷至595℃以下，然后空冷至室温。
② 加热到730～760℃，保温1h，以不高于110℃/h的速度炉冷至315℃以下，然后空冷至室温。
③ 加热到595～620℃，保温1h，然后空冷至室温。
④ 加热到1025～1050℃，保温1h，空冷至室温，然后在610～630℃，保温4h沉淀硬化处理，空冷至室温。
注：FN表示铁素体数。

2.1.5 防止施焊过程中焊条尾部发红的措施[1,2]

不锈钢焊条施焊过程中焊条熔化至整根长度的2/3时，焊条尾部会发红（甚至药皮开裂）、飞溅增大、焊缝凸起、焊缝成形恶化、脱渣困难。产生上述现象的主要原因是由于奥氏体不锈钢焊芯的电阻率大、导热性差；不锈钢焊接多数采用短弧焊接，所以熔滴过渡形式以大熔滴短路过渡较多，而短路过渡期间焊接电流很大，焊芯电阻产生的热量占电弧热份额很大，奥氏体导热很慢，随着焊接时间的增加奥氏体不锈钢焊芯的电阻热不断上升，致使焊至整根焊条长约2/3时，焊条尾部便会发红。又由于不锈钢焊芯线胀系数较大（比H08A焊芯的线胀系数大50%），当焊条尾部发红时，焊芯尺寸有较大的伸长和扩展，使药皮承受极大的扩胀力（药皮膨胀系数与焊芯膨胀系数不一致，且药皮强度低于焊芯的强度）而导致药皮开裂，使焊条工艺性急剧下降。

为了减少或避免不锈钢焊条的尾部发红和药皮开裂现象，可采取以下措施。

① 改变焊芯材质，采用铬不锈钢或低碳钢焊芯。例如以H08A为焊芯，在药皮中加入了铁粉和高铬、镍的原材料，通过药皮过渡合金元素方式而获得高熔敷效率的不锈钢焊条（例如A102T不锈钢焊条）。该焊条施焊时电弧稳定，熔渣流动良好，脱渣容易且药皮不发红，无药皮开裂现象。

② 采用不锈钢焊芯，通过改变药皮成分来提高电弧电压，熔滴过渡形式采用细滴渣壁过渡，由于细小的熔滴只占焊芯截面的较小部分，因而使焊芯的熔化加快，从而减少电阻热，以降低焊芯表面温度，使药皮的熔化速度减慢，促使其形成深套筒。深套筒的形成提高了电弧的名义电压，在保持电弧功率一定的条件下，即可减小焊接电流，从而避免了焊条尾部发红，并改善了焊接的综合工艺性能。

可防止焊条发红、药皮开裂的焊条包括A042Si、A042Mn、A052、A101、A201A、102A和A102T等牌号，详见表2-6。

不锈钢焊条的选择见表2-5（含力学性能和热处理要求）、表2-6（含焊条牌号与型号的对应关系）、表2-8（不锈钢与异种钢的焊接焊条的选择原则）、表2-9（适用于奥氏体不锈钢之间的焊接）、表2-10（适用于不同牌号的奥氏体不锈钢之间的焊接）、表2-11（不锈钢压力容器焊条电弧焊用焊条选择）、表2-13（适用于焊接不锈钢复合板时焊条的选用）、表2-14（铁素体不锈钢、马氏体不锈钢焊接用焊条），不锈钢与异种钢之间的焊接钢材分类分组见表2-12。国外铁素体不锈钢焊条的选用见表2-15，国外马氏体不锈钢焊条的选用见表2-16。

表 2-6　不锈钢焊条牌号与型号对应关系及其主要用途[3,4]

牌号	符合(相当)标准的焊条型号			熔敷金属主要化学成分(质量分数)/%	主要用途
	GB/T 983—2012	ISO 3581-B:2003	AWS A5.4:2006		
G202	E410-16	ES410-16	—	C≤0.12;Cr:11.0～13.5	用于焊接 06Cr13(0Cr13)、12Cr13(1Cr13)不锈钢结构,也可用于耐蚀、耐磨的表面堆焊
G202NiMo	—	—	—	C≤0.06;Cr:11.0～13.5 Ni:4.0～5.0;Mo:0.40～0.70	
G207	E410-15	ES410-15	—	C≤0.12;Cr:11.0～12.5	
G207NiMo	E410NiMo-15	ES410NiMo-15	E410NiMo-15	C≤0.06;Cr:11.0～12.5 Ni:4.0～5.0;Mo:0.40～0.70	用于 0Cr13NiMo 铸钢件的补焊和水电站过流部件汽蚀磨损后的堆焊修复以及同材质结构件的焊接
G207Ni6Mo	—	—	—	C≤0.06;Cr:11.0～12.5 Ni:5.0～6.5;Mo:0.40～0.70	用于 0Cr13Ni5Mo 和 0Cr13Ni6Mo 铸钢件的补焊和水电站过流部件汽蚀磨损后的堆焊修复以及同材质结构件的焊接
G207Ni6MoL	—	—	—	C≤0.03;Cr:11.0～12.5 Ni:5.0～6.5;Mo:0.40～0.70	用于 00Cr13Ni5Mo 和 00Cr13Ni6Mo 铸钢件的补焊和水电站过流部件汽蚀磨损后的堆焊修复以及同材质结构件的焊接
G217	E410-15	ES410-15	—	C≤0.12;Cr:11.0～13.5	用于焊接 06Cr13(0Cr13)、12Cr13(1Cr13)、20Cr13 不锈钢结构,如汽轮机叶片的补焊及对接,也可用于耐蚀耐磨的表面堆焊
G247	—	—	—	C≤0.06;Cr:13.0～14.0 Ni:3.5～4.5;Mo:0.40～0.70	用于同类不锈钢的焊接,也可用于耐蚀、耐磨堆焊
G302	E430-16	ES430-16	E430-16	C≤0.10;Cr:15.0～18.0	用于焊接耐蚀(硝酸)、耐热的 Cr17 不锈钢结构
G307	E430-15	ES430-15	E430-15	C≤0.10;Cr:15.0～18.0	
A001G15	E308L-15	ES308L-15	E308L-15	C≤0.04;Cr:18.0～21.0 Ni:9.0～11.0	适用于平焊、平角焊,同类型不锈钢的焊接
A002	E308L-16	ES308L-16	E308L-16	C≤0.04;Cr:18.0～21.0 Ni:9.0～11.0	用于焊接超低碳 Cr19Ni10 不锈钢结构,也可用于 06Cr18Ni11Ti 工作温度低于 300℃耐腐蚀的不锈钢结构;主要用于合成纤维、化肥、石油等设备的制造

续表

牌号	符合(相当)标准的焊条型号			熔敷金属主要化学成分(质量分数)/%	主要用途
	GB/T 983—2012	ISO 3581-B:2003	AWS A5.4:2006		
A002A	E308L-17	ES308L-17	E308L-17	C≤0.04;Cr:18.0～21.0 Ni:9.0～11.0	适用于焊接含钛稳定的奥氏体不锈钢和同类不锈钢。焊条直径≤3.2mm,可全位置焊接,其他规格仅用于平焊位置
A007	E308L-15	ES308L-15	E308L-15	C≤0.04;Cr:18.0～21.0 Ni:9.0～11.0	用于焊接超低碳 Cr19Ni10 不锈钢结构,也可用于 06Cr18Ni11Ti 工作温度低于 300℃耐腐蚀的不锈钢结构;主要用于合成纤维、化肥、石油等设备的制造
A012Si	—	—	—	C≤0.04;Si:3.5～4.5 Cr:18.0～22.0;Ni:12.0～15.0 Mo:0.2～0.5	用于抗浓硝酸超低碳(原 00Cr17Ni15Si4Nb)不锈钢的焊接
A002Nb	—	—	—	C≤0.04;Cr:18.0～21.0 Ni:9.0～11.0;Nb:8C～1.0	用于焊接重要的超低碳耐腐蚀含钛稳定的 Cr19Ni11Ti 型不锈钢
A002Mo	E308MoL-16	ES308MoL-16	E308MoL-16	C≤0.04;Cr:18.00～21.0 Ni:9.0～12.0;Mo:2.0～3.0	焊接超低碳不锈钢结构,也可用于 06Cr18Ni11Ti 与碳素钢的焊接。如合成纤维、石油、化肥等设备的制造
A022	E316L-16	ES316L-16	E316L-16	C≤0.04;Cr:17.0～20.0 Ni:11.0～14.0;Mo:2.0～3.0	用于焊接尿素、合成纤维等设备及相同类型的不锈钢结构,也可用于焊接焊后不能进行热处理的铬不锈钢以及复合钢和异种钢等
A022Si	—	—	—	C≤0.04;Cr:18.5～20.5 Ni:10.5～12.0;Mo:2.5～3.0 Si:0.7～1.1	焊接冶炼设备中的衬板或管材
A022L	—	—	—	C≤0.03;Cr:17.0～20.0 Ni:11.0～14.0;Mo:2.0～3.0	焊接核安全一级铬镍奥氏体不锈钢管道和容器构件及尿素、合成纤维等设备和焊后不能进行热处理的铬不锈钢、异种钢等

续表

牌号	符合(相当)标准的焊条型号			熔敷金属主要化学成分(质量分数)/%	主要用途
	GB/T 983—2012	ISO 3581-B:2003	AWS A5.4:2006		
A027	E316L-15	ES316L-15	—	C≤0.04;Cr:17.0～20.0 Ni:11.0～14.0;Mo:2.0～3.0	用于焊接合成纤维等设备及相同类型的不锈钢结构,也可用于焊后不能进行热处理的铬不锈钢以及复合钢和异种钢等
A032	E317LMoCu-16	—	—	C≤0.04;Cr:18.0～21.0 Ni:12.0～14.0;Mo:2.0～2.5 Cu≤2.0	用于焊接合成纤维等设备,在稀、中浓度硫酸介质中工作的同类型超低碳不锈钢结构,也可焊接 Cr10Si3 耐酸钢
A032Mo	E317L-16	ES317L-16	E317L-16	C≤0.04;Cr:18.0～21.0 Ni:12.0～14.0;Mo:3.0～4.0	用于焊接 AISI317、317L 等相同类型的不锈钢材料,还适用于复合钢、异种钢的焊接及堆焊耐蚀层
A037Mo	E317L-15	ES317L-15	E317L-15	C≤0.04;Cr:18.0～21.0 Ni:12.0～14.0;Mo:3.0～4.0	用于焊接 AISI317、317L 等相同类型的不锈钢材料,还适用于复合钢、异种钢的焊接及堆焊耐蚀层
A042	E309LMo-16	ES309LMo-16	E309LMo-16	C≤0.04;Cr:22.0～25.0 Ni:12.0～14.0;Mo:2.0～3.0	用于相同类型的超低碳不锈钢材料(如尿素合成塔衬里)及异种钢焊接等
A042Si	—	—	—	C≤0.04;Cr≈22.5 Ni≈13.5;Mo≈2.7	相当于瑞典 AVESTA P5 超低碳不锈钢焊条,交直流两用[4],用于相同类型的超低碳不锈钢(如尿素合成塔衬里)及异种钢焊接等
A042Mn	—	—	—	C≤0.04;Mn:3.0～5.5 Cr:24.0～26.0; Ni:19.0～23.0;Mo:1.9～2.4	相当于荷兰 Philips BM310MoL 超低碳不锈钢焊条,交直流两用,具有良好的耐腐蚀,用于尿素设备,如 Cr25Ni22Mo2 型不锈钢焊接
A052	—	—	—	C≤0.04;Cr:17.0～22.0 Ni:22.0～27.0; Mo:4.0～5.0;Cu≤2.0	焊缝金属具有耐含甲酸、醋酸介质点蚀及抗氯离子腐蚀性能,比 A017、A022 等焊条抗腐蚀性好。用于耐硫酸、醋酸、磷酸腐蚀的反应器、分离器,同时可用于耐海水腐蚀用钢(022Cr18Ni24Mo5)以及异种钢的焊接

续表

牌号	符合(相当)标准的焊条型号			熔敷金属主要化学成分(质量分数)/%	主要用途
	GB/T 983—2012	ISO 3581-B:2003	AWS A5.4:2006		
A062	E309L-16	ES309L-16	E309L-16	C≤0.04;Cr:22.0～25.0 Ni:12～14.0;Mo≤0.75	用于合成纤维、石油化工等设备制造的相同类型的不锈钢结构、复合钢和异种钢等构件,也可用于核反应堆压力容器内壁过渡层堆焊和塔内构件焊接
A067	E309L-15	ES309L-15	E309L-15	C≤0.04;Cr:22.0～25.0 Ni:12～14.0;Mo≤0.75	用于合成纤维、石油化工等设备制造的相同类型的不锈钢结构、复合钢和异种钢等构件,也可用于核反应堆压力容器内壁过渡层堆焊和塔内构件焊接
A072	—	—	—	C≤0.04;Cr:27.0～29.0 Ni:14.0～16.0	用于00Cr25Ni20Nb钢的焊接,如核燃料设备等
A082	—	—	—	C≤0.035;Si:3.5～4.5 Cr:17.0～21.0;Ni:13.0～15.0	焊条药皮具有抗红开裂性能,用于00Cr17Ni15Si4Nb、00Cr14Ni14Si4等耐浓硝酸腐蚀钢的焊接和补焊
A097	E332LR-15	ES332LR-15	—	C≤0.03;Cr:19.0～21.0 Ni:32.0～36.0;Mo:2.0～3.0; Cu:3.0～4.0	对硫酸、磷酸及氟酸制造具有较好的耐蚀作用。用于20Cb3钢的焊接及低碳钢与20Cb3的焊接
A101	E308-16	ES308-16	E308-16	C≤0.08;Cr:18.0～21.0 Ni:9.0～11.0	焊条药皮具有不发红、不开裂的特点,用于焊接工作温度低于300℃的耐腐蚀的06Cr19Ni10、06Cr18Ni11Ti型不锈钢结构
A102	E308-16	ES308-16	E308-16	C≤0.08;Cr:18.0～21.0 Ni:9.0～11.0	用于焊接工作温度低于300℃的耐腐蚀的06Cr19Ni10、06Cr18Ni11Ti型不锈钢结构
A102A	E308-17	ES308-17	E308-17	C≤0.08;Cr:18.0～21.0 Ni:9.0～11.0	焊条药皮具有耐发红、熔化速度快的特点,用于焊接工作温度低于300℃的耐腐蚀的06Cr19Ni10、06Cr18Ni11Ti型不锈钢结构

续表

牌号	符合(相当)标准的焊条型号			熔敷金属主要化学成分(质量分数)/%	主要用途
	GB/T 983—2012	ISO 3581-B:2003	AWS A5.4:2006		
A102T	E308-16	ES308-16	E308-16	C≤0.08;Cr:18.0～21.0 Ni:9.0～11.0	熔覆率高,焊条药皮无发红、开裂现象,用于焊接工作温度低于300℃的耐腐蚀的06Cr19Ni10、06Cr18Ni11Ti的不锈钢结构以及堆焊不锈钢表面层
A102SiN	—	—	—	C≤0.10;Cr:20.0～22.0 Ni:9.0～11.0;Si:1.40～2.00 N:0.08～0.18	用于253MA、ZG40Cr24Ni9Si2NRe等结构的焊接,如锅炉燃烧器
A107	E308-15	ES308-15	E308-15	C≤0.08;Cr:18.0～21.0 Ni:9.0～11.0	用于焊接工作温度低于300℃的耐腐蚀的06Cr19Ni10型不锈钢结构,也可焊接一些焊接性较差的钢材(如高铬钢等)以及堆焊不锈钢表面层
A112	—	—	—	C≤0.12;Mn≤2.5;Cr:17.0～22.0 Ni:7.0～11.0	用于一般耐腐蚀性能要求不高的Cr19Ni9不锈钢的焊接
A117	—	—	—	C≤0.12;Mn≤2.5, Cr:17.0～22.0;Ni:7.0～11.0	用于一般耐腐蚀性能要求不高的Cr19Ni9不锈钢的焊接
A132	E347-16	ES347-16	—	C≤0.08;Cr:18.0～21.0 Ni:9.0～11.0;Nb:8C～1.0	用于焊接重要的耐腐蚀含钛稳定的07Cr19Ni11Ti型不锈钢
A132A	E347-17	ES347-17	—		
A137	E347-15	E347-15	—		
A146	—	—	—	C≤0.12;Mn:4.0～7.0 Cr:19.0～22.0;Ni:8.0～11.0	用于焊接重要的0Cr20Ni10Mn6型不锈钢结构
A147	—	—	—	C≤0.12;Mn:4.0～7.0 Cr:19.0～22.0;Ni:8.0～11.0	用于焊接重要的0Cr20Ni10Mn6不锈钢结构,也可用于特种钢和异种钢的焊接

续表

牌号	符合(相当)标准的焊条型号			熔敷金属主要化学成分(质量分数)/%	主要用途
	GB/T 983—2012	ISO 3581-B:2003	AWS A5.4:2006		
A172	E307-16	ES307-16	E307-16	C:0.04～0.14;Mn:3.30～4.75 Cr:18.0～21.5;Ni:9.0～10.7	适用 ASTM 307 钢及其他异种钢焊接,也可用于耐冲击腐蚀钢和过渡层的堆焊。如高锰钢、淬硬钢等
A201	E316-16	ES316-16	E316-16	C≤0.08;Cr:17.0～20.0 Ni:11.0～14.0;Mo:2.0～3.0	用于焊接在有机酸和无机酸(非氧化性酸)介质中工作的 06Cr17i12Mo2 不锈钢结构,也可用于焊接焊后不能进行热处理的高铬钢或异种钢
A202	E316-16	ES316-16	E316-16		用于焊接在有机酸和无机酸(非氧化性酸)介质中工作的 06Cr17i12Mo2 不锈钢或异种钢
A202NE	E316-16	ES316-16	E316-16	C≤0.06;Cr:17.0～20.0 Ni:11.0～14.0;Mo:2.0～3.0	焊接核安全二级铬镍奥氏体不锈钢管道和容器。也用于焊接有机酸和无机酸(非氧化性酸)介质中工作的 06Cr17i12Mo2 不锈钢或异种钢
A207	E316-15	ES316-15	E316-15	C≤0.08;Cr:17.0～20.0 Ni:11.0～14.0;Mo:2.0～3.0	用于焊接低碳的 06Cr17i12Mo2 不锈钢结构,也可焊接要求焊后不进行热处理的高铬钢(如 Cr13、Cr17 等),以及用于异种钢的焊接
A212	E318-16	ES318-16	E318-16	C≤0.08;Cr:17.0～20.0 Ni:11.0～14.0 Mo:2.0～3.0;Nb:6C～1.0	用于重要的 06Cr17i12Mo2、Cr17Ni14Mo2 等不锈钢的焊接。如尿素合成塔、维尼纶设备等接触腐蚀介质的部件
A222	E317MoCu-16	—	—	C≤0.08;Cr:18.0～21.0 Ni:12.0～14.0;Mo:2.0～2.5;Cu≤2.0	用于焊接相同类型的含铜不锈钢设备

续表

牌号	符合(相当)标准的焊条型号			熔敷金属主要化学成分(质量分数)/%	主要用途
	GB/T 983—2012	ISO 3581-B:2003	AWS A5.4:2006		
A232	E318V-16	—	—	C≤0.08;Cr:17.0～20.0 Ni:11.0～14.0 Mo:2.0～2.5;V:0.3～0.7	用于焊接耐热和要求耐蚀的 Cr19Ni10 及 06Cr17Ni12Mo2 不锈钢结构
A237	E318V-15	—	—		用于要求一般耐热而又要求一定耐蚀性的 Cr19Ni10 及 06Cr17Ni12Mo2 不锈钢结构的多层焊接
A242	E317-16	ES317-16	E317-16	C≤0.08;Cr:18.0～21.0 Ni:12.0～14.0;Mo:3.0～4.0	用于相同类型的不锈钢材料以及复合钢、异种钢的焊接
A301	E309-16	ES309-16	E309-16	C≤0.15;Cr:22.0～25.0 Ni:12.0～14.0	用于焊接同类型不锈钢、不锈钢衬里、异种钢、以及高铬钢,高锰钢等
A302	E309-16	ES309-16	E309-16		用于焊接相同类型的不锈钢、不锈钢衬里、异种钢(Cr19Ni9 同低碳钢)以及高铬钢、高锰钢等
A307	E309-15	ES309-15	E309-15		用于焊接相同类型的不锈钢、异种钢以及高铬钢、高锰钢等
A312	E309Mo-16	ES309Mo-16	E309Mo-16	C≤0.12;Cr:22.0～25.0 Ni:12.0～14.0;Mo:2.0～3.0	用于焊接耐硫酸介质(硫氢)腐蚀的同类型不锈钢容器,也可用于不锈钢衬里、复合钢板、异种钢的焊接
A312SL	E309Mo-16	ES309Mo-16	E309Mo-16		焊接 Q235、Q245R 和 Cr5Mo 等钢材表面渗铝部件,也可用于异种钢材的焊接
A317	E309Mo-15	ES309Mo-15	E309Mo-15		用于焊接耐硫酸介质(硫氢)腐蚀的同类型不锈钢、复合板、异种钢

续表

牌号	符合(相当)标准的焊条型号			熔敷金属主要化学成分(质量分数)/%	主要用途
	GB/T 983—2012	ISO 3581-B:2003	AWS A5.4:2006		
A402	E310-16	ES310-16	E310-16	C:0.08～0.20;Cr:25.0～28.0 Ni:20.0～22.5	用于在高温条件下工作的同类型耐热不锈钢焊接,也可用于硬化性大的铬钢(如Cr5Mo、Cr9Mo、Cr13、Cr28等)以及异种钢的焊接
A407	E310-15	ES310-15	E310-15		用于同类型的耐热不锈钢、不锈钢衬里以及异种钢焊接,也可用来焊接硬化性大的Cr5Mo、Cr9Mo、Cr13及Cr28钢等结构
A412	E310Mo-16	ES310Mo-16	E310Mo-16	C≤0.12;Cr:25.0～28.0 Ni:20.0～22.0;Mo:2.0～3.0	用于焊接在高温条件下工作的耐热不锈钢,也可用来焊接不锈钢衬里,异种钢等。在焊接淬硬性高的碳钢、低合金钢韧性极好
A422	—		—	C≤0.20;Cr:23.0～27.0 Ni:16.0～20.0;Mn:5.0～10.0	用于焊补炉卷轧机上的Cr25Ni20Si2奥氏体耐热钢卷筒,也可用于焊接异种钢等
A427	—		—		
A432	E310H-16	ES310H-16	E310H-16	C:0.35～0.45;Cr:25.0～28.0 Ni:20.0～22.5	专用于焊接HK-40耐热钢
A437Mn	—	—	—	C:0.35～0.45 Cr:25.0～28.0;Ni:20.0～22.5	用于焊接HK-40高温炉管和炉底辊
A437MoCu	—	—	—	C≤0.10;Cr:19.0～25.0 Ni:21.0～25.0	用于化学成分相当的耐硫酸腐蚀用钢的焊接
A462	—	—	—	C:0.15～0.30 Cr:25.0～28.0;Ni:30～35	相当于日本的HM-40耐热不锈钢焊条,熔敷金属在800～1200℃高温条件下具有耐腐蚀耐高温性。用于高温条件下工作的炉管(如HK-40、HP-40、RC-1、RS-1、IN-80)等焊接
A502	E16-25MoN-16	—	—	C≤0.12;Cr:14.0～18.0 Ni:22.0～27.0;Mo:5.0～7.0;N≥0.1	用于焊接淬火状态下的低合金和中合金钢、异种钢及刚度较大的结构以及相应的热强钢等。如淬火状态下的30CrMnSi以及不锈钢、碳钢、铬钢及异种钢焊接
A507	E16-25MoN-15	—	—		

续表

牌号	符合(相当)标准的焊条型号			熔敷金属主要化学成分(质量分数)/%	主要用途
	GB/T 983—2012	ISO 3581-B:2003	AWS A5.4:2006		
A512	E16-8-2-16	ES16-8-2-16	—	C≤0.10;Cr:14.5～16.5 Ni:7.5～9.5;Mo:1.0～2.0	主要用于高温、高压不锈钢管路的焊接
A607	E330MoMnWNb-15	—	—	C≤0.20;Cr:15.0～17.0 Ni:33.0～37.0;Mo:2.0～3.0 W:2.0～3.0;Nb:1.0～2.0	用于850～900℃高温条件下工作的同类不锈钢材料的焊接以及制氢转化炉中集合管和膨胀管(如Cr25Ni32和Cr18Ni37材料)的焊接
A707	—	—	—	C≤0.15;Mn:11.0～14.0 Si≤1.00;Cr:16.0～18.0 Mo:1.0～2.0	用于醋酸、维尼纶、尿素等生产设备的Cr17Mn13MoN(与Q255钢)的焊接
A717	—	—	—	C:0.15～0.25;Mn:14.0～16.0 Cr:14.0～16.0;Ni:1.5～3.0 N:0.1～0.3	用于20Cr15Mn15Ni2N低碳不锈钢电物理装置结构件或07Cr19Ni11Ti异种钢焊接
A802	—	—	—	C≤0.10;Cr:18.0～21.0 Ni:7.0～19.0;Mo:3.0～5.0 Cu:1.5～2.5	用于焊接硫酸(质量分数)浓度50%和承受一定工作温度及大气压力的制造合成橡胶的管道以及Cr18Ni18Mo2Cu2Ti等
A902	E320-16	ES320-16	E320-16	C≤0.07;Cr:19.0～21.0 Ni:32.0～36.0;Mo:2.0～3.0 Cu:3.0～4.0;Si≤0.6 Nb:8C～1.00	用于在硫酸、硝酸、磷酸和氧化性酸腐蚀介质中工作的Carpenter 20Cb镍合金的焊接
AF2209-16	E2209-16	ES2209-16	E2209-16	C≤0.04;Cr:21.5～23.5 Ni:8.5～10.5;Mo:2.5～3.5	主要用于石化、水工行业同类型的超低碳不锈钢材料的焊接,如022Cr22Ni5Mo3N双相不锈钢的焊接
AF2209-15	E2209-15	ES2209-15	E2209-15	C≤0.04;Cr:21.5～23.5 Ni:8.5～10.5;Mo:2.5～3.5	主要用于石化、水工行业同类型的超低碳不锈钢材料的焊接,如022Cr22Ni5Mo3N双相不锈钢的焊接

续表

牌号	符合(相当)标准的焊条型号			熔敷金属主要化学成分(质量分数)/%	主要用途
	GB/T 983—2012	ISO 3581-B:2003	AWS A5.4:2006		
AF2209-17	E2209-17	ES2209-17	E2209-17	C≤0.04;Cr:21.5～23.5 Ni:8.5～10.5;Mo:2.5～3.5	主要用于石化、水工行业同类型的超低碳不锈钢材料的焊接,如022Cr22Ni5Mo3N双相不锈钢的焊接
AF2553-16	E2553-16	ES2553-16	E2553-16	C≤0.06;Cr:24.0～27.0 Ni:6.5～8.5;Mo:2.9～3.9	用于焊接含铬量约为25%的双相不锈钢,如022Cr25Ni7Mo4N、03Cr25Ni6Mo3Cu2N、UNS 32550(alloy255)等
AF2593-15	E2593-15	—	E2593-15	C≤0.04;Cr:24.0～27.0 Ni:8.5～10.5;Mo:2.9～3.9	用于海洋石油、天然气、石化行业同类型双相不锈钢的焊接,如03Cr25Ni6Mo3Cu2N等
AF2594-16	E2593-16	—	E2593-16	C≤0.04;Cr:24.0～27.0 Ni:8.0～10.5;Mo:3.5～4.5	用于海洋石油、天然气、石化行业同类型双相不锈钢的焊接,如00Cr25Ni7Mo4N等
AF2594-15	E2594-15	—	E2594-15	C≤0.04;Cr:24.0～27.0 Ni:8.0～10.5;Mo:3.5～4.5	用于海洋石油、天然气、石化行业同类型双相不锈钢的焊接,如00Cr25Ni7Mo4N等
AF2595-15	E2595-15	—	E2595-15	C≤0.04,Cr:24.0～27.0 Ni:8.0～10.5;Mo:3.5～4.5	用于海洋石油、天然气、石化行业同类型双相不锈钢的焊接,如S32550、S32750、S32760等

续表

牌号	符合(相当)标准的焊条型号			熔敷金属主要化学成分(质量分数)/%	主要用途
	GB/T 983—2012	ISO 3581-B:2003	AWS A5.4:2006		
AF312-16	E312-16	ES312-16	E312-16	C≤0.15;Cr:28.0～32.0 Ni:8.0～10.5	用于29-9系不锈钢、铸钢、异种钢的焊接，以及各种堆焊、易开裂、易产生气孔的材料的焊接
AF312Co-16	—	—	—	C≤0.15;Cr:26.0～29.0 Ni:8.0～12.0;Co:0.20～0.50	用于高碳钢、高合金钢、工具钢、弹簧钢、锰合金钢、表面硬化钢、铸钢及高速钢的焊接，同时也适用于上述钢种的异种钢结构的焊接
AF312-15	E312-15	ES312-15	E312-15	C≤0.15;Cr:28.0～32.0 Ni:8.0～10.5	主要用于喷气发动机部件等耐热钢的焊接，特别适用于16%Cr-25%Ni-66%Mo耐热钢与中碳Cr-Mo钢的焊接，还用于高碳钢、工具钢及异种金属的焊接

注：1. HK-40是在1Cr25Ni20的基础上发展起来的高碳纯奥氏体耐热不锈钢离心铸造炉管，一般在800～1000℃高温下工作，要求有高的热强性、抗氧化性、抗增碳性和良好的韧性。H表示在650℃以上的高温，K表示铬镍的公称含量为25%～20%，40为含碳量的万分比。

2. 焊条牌号的后缀符号的含义，NE：核电工程焊条；SL：渗铝钢专用焊条；T：焊芯为碳钢。

表2-7 不锈钢焊条牌号与焊缝金属化学成分等级的关系[4]

焊条牌号	焊缝金属主要化学成分(质量分数)/%	焊条牌号	焊缝金属主要化学成分(质量分数)/%
G2××	Cr约为13	A4××	Cr约为26，Ni约为21
G3××	Cr约为17	A5××	Cr约为16，Ni约为25
A0××	C≤0.04(超低碳)	A6××	Cr约为16，Ni约为35
A1××	Cr约为19，Ni约为10	A7××	铬锰氮不锈钢
A2××	Cr约为18，Ni约为12	A8××	Cr约为18，Ni约为18
A3××	Cr约为23，Ni约为13	A9××	特殊性

表 2-8　不锈钢与异种钢的焊接焊条选择[6]

母材	母材									
	Mn13 钢	低 Ni 钢	Ni-Cr-Mo 钢	Ni-Cr 钢	Cr-Mo 钢	高碳钢	中碳钢	低碳钢	Cr13、Cr17 钢	18-8 钢
18-8 钢	1、2 A	2、3 B	2、3 B	2、3 B	2、3 B	2、3 C	2、3 A	2、3 A	2、3 C	18-8 钢
Cr13、Cr17 钢	2、3 B	2、3 C	2、3 C	2、3 C	2、3 C	2、3 C	2、3 C	2、3 C	2、3 C	
低碳钢 C<0.25	1、2 A	2.5Ni A	2、3 B	2、3 C	2、3 B	2、3 A	J427 A	J427 A		
中碳钢 C:0.25～0.45	1、2 A	2.5Ni A	2、3 B	2、3 B	2、3 B	2、3 A	J507 A			
高碳钢 C>0.45	1、2 B	2、3 A	2、3 C	2、3 C	2、3 C	2、3 C				
Cr-Mo 钢	2、3 B	2、3 B	2、3 C	2、3 C	2、3 C					
Ni-Cr 钢	2、3 B	2、3 B	2、3 C	2、3 C						
Ni-Cr-Mo 钢	2、3 B	2、3 B	2、3 C							
低 Ni 钢	1、2 A	2.5Ni A								
Mn13 钢	1 A									

注：1. 表中 1、2、3 分别表示 18-12Mo 型、25-13 型、25-20 型电焊条。

2. 表中 A、B、C 分别表示室温（约 50℃）、50～150℃、150～250℃三种预热温度。

3. 不锈钢板的塞焊及复合钢的过渡层（混有碳钢部分）使用 25-13 型、25-20 型不锈钢焊条。

4. 预热温度根据母材材质、结构及母材热处理状态来决定。

表 2-9　常用奥氏体不锈钢焊接用焊条的选择[4]

钢材牌号	焊条 牌号	GB/T 983—2012 的焊条型号
S30408 或 06Cr19Ni10(0Cr18Ni9)、12Cr18Ni9(1Cr18Ni9)、06Cr18Ni11Ti(0Cr18Ni10Ti)	A102 A102A A107	E308-16 E308-17 E308-15
S30403 或 022Cr19Ni10(00Cr18Ni9)、06Cr18Ni11Ti(0Cr18Ni10Ti)	A002 A002A	E308L-16 E308L-16
S32168 或 06Cr18Ni11Ti(0Cr18Ni10Ti)、1Cr18Ni9Ti、07Cr19Ni11Ti(1Cr18Ni11Ti)	A132 A132A A137	E347-16 E347-17 E347-15
S31608 或 06Cr17Ni12Mo2(0Cr17Ni12Mo2)	A202	E316-16
S31603 或 022Cr17Ni12Mo2(00Cr17Ni12Mo2)	A022	E316L-16
S31688 或 06Cr18Ni12Mo2Cu2(0Cr18Ni12Mo2Cu2)	A222	E317MoCu-16
S31683 或 022Cr18Ni14Mo12Cu2(00Cr18Ni14Mo2Cu2)	A032	E317LMoCu-16
S31708 或 06Cr19Ni13Mo3(0Cr19Ni13Mo3)	A242	E317-16
S31703 或 022Cr19Ni13Mo3(00Cr19Ni13Mo3)	—	E317L-16
S30908 或 0Cr23Ni13(0Cr23Ni13)	A302 A307	E309-16 E309-15
4Cr25Ni20、HK-40	A432	E310H-16
S31008 或 06Cr25Ni20(0Cr25Ni20)	A402	E310-16
S31668 06Cr17Ni12Mo3Ti(0Cr18Ni12Mo3Ti)	A242	E317-16

表 2-10　不同牌号的奥氏体不锈钢之间焊接用焊条[6]

母材	S30403	S30908	S31008	S31608	S31603	S31708	S32168
S30408	A002	A102 A302	A102 A302 A402	A102 A202	A102 A202	A102 A202 A242	A102
S30403		A102 A302	A302 A402	A102 A202	A002 A022	A202 A242	A002 A132
S30908			A302 A402	A302 A202	A302 A022	A302 A202	A302 A132
S31008				A202	A202	A242	A132 A402
S31608					A202	A202 A242	A132 A202
S31603						A242 A022	A202
S31708							A242 A132

表 2-11 不锈钢压力容器焊条电弧焊用焊条[7]

同种不锈钢相焊			不锈钢与碳钢相焊		
钢号	焊条		接头母材类别号或组别号	焊条	
	型号	牌号示例		型号	牌号示例
06Cr18Ni10	E308-16	A102	Fe-4＋Fe-5A	E309-15	A307
	E308-15	A107	Fe-4-2＋Fe-5A	E309-15	A307
06Cr18Ni11Ti	E347-16	A132	Fe-4＋Fe-5B-1	E310-15	A407
	E347-15	A137	Fe-4、Fe-5A 与 Fe-6、Fe-7 相焊	E309-16	A302
06Cr17Ni12Mo2	E316-16	A202		E309-15	A307
	E316-15	A207	Fe-4、Fe-5B-1 与 Fe-6、Fe-7 相焊	E310-15	A407
06Cr17Ni12Mo2Ti	E316L-16	A022			
	E318-16	A212	Fe-1-1、Fe-1-2、Fe-1-3、Fe-3-1、Fe-3-2 与 Fe-8-1 相焊	E309-16	A302
				E309-15	A307
				E309Mo-16	A312
06Cr19Ni13Mo3	E317L-16	A242	Fe-1-4、Fe-3-3 与 Fe-8-1 相焊	E310-16	A402
				E310-15	A407
022Cr19Ni10	E308L-16	A002	Fe-4、Fe-5A 与 Fe-8-1 相焊	E309-16	A302
				E309-15	A307
022Cr17Ni12Mo2	E316L-16	A022	Fe-5B-1 与 Fe-8-1 相焊	E310-16	A402
022Cr19Ni13Mo3	E317L-16	—		E310-15	A407
06Cr13	E410-16 E410-15	G202 G207			

注：Fe-1-1、Fe-1-2、Fe-1-3、Fe-3-1、Fe-3-2、Fe-4、Fe-4-2、Fe-5A、Fe-5B-1、Fe-6、Fe-7、Fe-8-1 包含的材料牌号见表 2-12。

表 2-12 不锈钢与异种钢之间的焊接钢材分类分组[7]

类别	组别	钢号示例
Fe-1	Fe-1-1	20,10,Q245R
	Fe-1-2	Q345R,16MnDR,15MnNiDR,09MnNiDR,Q345D,16Mn,16MnD,09MnNiD,09MnD
	Fe-1-3	Q370R,15MnNiNbDR,08MnNiMoVD,12MnNiVR
	Fe-1-4	07MnMoVR,07MnNiMoDR,07MnNiVDR
Fe-3	Fe-3-1	12CrMo
	Fe-3-2	20MnMo,20MnMoD,10MoWVNb,12SiMoVNb
	Fe-3-3	13MnNiMoR,18MnMoNbR,20MnMoNb,20MnNiMo
Fe-4	Fe-4-1	15CrMoR,15CrMo,14Cr1Mo,14Cr1MoR
	Fe-4-2	12Cr1MoVR,12Cr1MoVG
Fe-5A	—	12Cr2Mo1,12Cr2Mo,12Cr2Mo1R,12Cr2MoG,08Cr2A1Mo
Fe-5B	Fe-5B-1	1Cr5Mo
Fe-6		06Cr13(S41008)
Fe-7	Fe-7-1	06Cr13(S11306),06Cr13Al

续表

类别	组别	钢号示例
Fe-8	Fe-8-1	06Cr18Ni9，00Cr19Ni10，0Cr17Ni12Mo2，06Cr19Ni10，022Cr19Ni10，06Cr17Ni12Mo2，00Cr17Ni14Mo2，0Cr18Ni10Ti，022Cr17Ni12Mo2，06Cr18Ni11Ti，0Cr18Ni12Mo2Ti，0Cr19Ni13Mo3，06Cr17Ni12Mo2Ti，06Cr19Ni13Mo3 00Cr19Ni13Mo3，022Cr19Ni13Mo3，06Cr17Ni12Mo2
	Fe-8-2	2Cr23Ni13，06Cr23Ni13，2Cr25Ni20，06Cr25Ni20

注：钢号分类、分组同 NB/T 47014—2011。

表 2-13　压力容器不锈钢复合板焊条电弧焊焊条的选用[7]

不锈钢复合钢		基层用焊材	过渡层用焊条		覆层用焊条	
复层钢号	基层钢号		型号	对应牌号	型号	对应牌号
06Cr13	Q235B Q235C Q245R 16Mn Q345R 20MnMo 15CrMoR	按 NB/T 47015—2011 (JB/T 4709) 表 1 选用焊条	E309-16 E309-15	A302 A307	E347-16 E347-15 E309-16 E309-15	A132 A137 A302 A307
06Cr19Ni10			E309-16 E309-15	A302 A307	E308-16 E308-15	A102 A107
06Cr18Ni11Ti					E347-16 E347-15	A132 A137
022Cr19Ni10					E308L-16	A002
06Cr17Ni12Mo2			E309Mo-16	A312	E316-16 E316-15	A202 A207
06Cr17Ni12Mo2Ti						
06Cr19Ni13Mo3					E316L-16 E318L-16	A022 A212
022Cr17Ni12Mo2			E309MoL-16	A042	E316L-16	A022
022Cr19Ni13Mo3						

表 2-14　铁素体不锈钢、马氏体不锈钢焊条的选用[2,8]

类别	钢号	焊条型号	焊条牌号	焊缝金属类型	预热及道间温度/℃	焊后热处理	选用原则
铁素体铬不锈钢	022Cr12 06Cr13 06Cr13Al	E410-16 E410-15 E410-15	G202 G207 G217	Cr13	300～350	700～750℃空冷	耐蚀、耐热
		E308-16 E308-17 E308-15	A102 A102A A107	Cr18Ni9	150～300	—	高塑、韧性
		E309-16 E309-15	A302 A307	Cr23Ni13	150～300		高塑、韧性
		E310-16 E310-15	A402 A407	Cr26Ni21			
	10Cr17 10Cr17Mo 019Cr19Mo2NbTi	E430-16 E430-15	A402 A407	Cr26Ni21	120～200	700～800℃	
		E316-16 E316-15	A202 A207	Cr18Ni12Mo2	70～100	—	
		E309-16 E309-15	A302 A307	Cr23Ni13			
		E310-16 E310-15	A402 A407	Cr26Ni21			
	008Cr27Mo 008Cr30Mo2	E310-16 E310-15 E310Mo-16	A402 A407 A412	Cr26Ni21	70～100	—	

续表

类别	钢号	焊条型号	焊条牌号	焊缝金属类型	预热及道间温度/℃	焊后热处理	选用原则
马氏体铬不锈钢	12Cr13 (1Cr13) 20Cr13 (2Cr13)	E410-16 E410-15 E410-15	G202 G207 G217	Cr13	300～350	700～750℃空冷	耐蚀、耐热
		E309-16 E309-15	A302 A307	Cr25Ni13	150～300	—	高塑、韧性
		E310-16 E310-15	A402 A407	Cr25Ni20			
	14Cr17Ni2 (1Cr17Ni2)	E430-16 E430-15	G302 G307	Cr13	300～350	700～760℃空冷	耐蚀、耐热
		E308-16 E308-17	A102 A107	Cr18Ni9	200～300	—	高塑、韧性
		E309-16 E309-15	A302 A307	Cr25Ni13			
		E310-16 E310-15	A402 A407	Cr25Ni20			

表 2-15 国外铁素体不锈钢焊条的选用[2]

钢号			焊接材料型号		
AISI	UNS	德国钢号	第一选择	第二选择	第三选择
405	S40500	1.4002	430	309L/309Mo	308
409	S40900	1.4512	309L/309Mo	312	
429	S42900	1.4001	430	308/308L	309L/309Mo
430	S43000	1.4016	430	308/308L	309L/309Mo
430F	S43020	1.4104	430	308/308L	309L/309Mo
430FSe	S43023		430	308/308L	309L/309Mo
434	S43400	1.4113	430	308/308L	309L/309Mo
436	S43500		430	308/308L	309L/309Mo
442	S44200		316L	318	309L/309Mo
444	S44400	1.4521	316L	318	309L/309Mo
446	S44600	1.4762	308/308L	309L/309Mo	310

表 2-16 国外马氏体不锈钢焊条的选用[2]

钢号			焊接材料型号		
AISI	UNS	德国钢号	第一选择	第二选择	第三选择
3Cr12①			309L/309Mo	316L	308L
410	S41000	1.4006	410	309L/309Mo	310
414	S41400		410	309L/309Mo	310
415	S41500	1.4313	410	309L/309Mo	310
416	S41600		410	309L/309Mo	310

续表

钢号			焊接材料型号		
AISI	UNS	德国钢号	第一选择	第二选择	第三选择
416Se	S41623		410	309L/309Mo	310
420	S42000		410	309L/309Mo	310
431	S43100	1.4057	430	308L/308	309
440A	S44002		312	309L/309Mo	
440B	S44003		312	309L/309Mo	
440C	S44004		312	309L/309Mo	

① B. H. P 公司的产品牌号。

2.2 不锈钢焊丝与焊带

2.2.1 实心焊丝

不锈钢实心焊丝按焊接方法的不同，可分为气体保护焊用焊丝和埋弧焊用焊丝。

(1) 气体保护焊用焊丝

气体保护焊按保护气体的化学成分分为惰性气体（例如：氩气、氦气）保护焊和混合气体（例如：98%氩气+2%氧气或 95%氩气+5%二氧化碳）保护焊两种。

① 惰性气体保护焊焊丝。惰性气体保护焊接时焊接区的金属不会被氧化，所以焊丝熔化后化学成分基本不变，即焊缝金属的化学成分就是焊丝的化学成分。焊接时要选择与母材化学成分接近的焊丝，焊丝的化学成分见表 2-17，不锈钢压力容器焊接用实心焊丝的选用见表 2-18、表 2-19。各牌号实心不锈钢焊丝的主要用途见表 2-20。非重要件焊接用焊丝可从不锈钢母材截取板条作填充材料。对钢棒直径、钢丝直径和钢丝盘内径均有一定的要求，分别见表 2-23～表 2-25。其中钢丝直径和钢丝盘内径是气体保护熔化极焊接方法提出的特殊要求。钢棒长度为 1000mm，允许正偏差≤50mm。钢丝应规整，不得散乱或成“∞”字形。

不锈钢压力容器用各种焊丝应符合 NB/T 47018—2011（JB/T 4744）《承压设备焊接材料订货技术条件》，焊丝的选用应符合 NB/T 47015—2011（JB/T 4709）《压力容器焊接规程》、HG/T 20581《钢制化工容器材料选用规定》等标准的规定。

② 混合气体保护焊用焊丝。混合气体保护焊用焊丝亦选用惰性气体保护焊焊丝。

(2) 不同标准不锈钢焊丝（焊带）的对应关系

GB/T 29713—2013《不锈钢焊丝和焊带》标准规定的不锈钢焊丝及焊带的化学成分与 YB/T 5092—2005《焊接用不锈钢焊丝》规定的焊丝的化学成分非常接近。它们之间的详细对比见表 2-21。GB/T 29713—2013 标准适用于熔化极气体保护电弧焊、非熔化极气体保护电弧焊、埋弧焊、电渣焊、等离子弧焊及激光焊等用不锈钢焊丝、填充丝及焊带。该标准规定的焊丝、焊带化学成分见表 2-34（该表列出的为焊丝型号，该标准的焊丝与焊带的化学成分一致），力学性能参见表 2-35。

表 2-17 不锈钢焊丝类型、牌号及化学成分[9]

类型	序号	牌号	化学成分(质量分数,熔炼分析)/%①										
			C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	N	其他
奥氏体型	1	H05Cr22Ni11Mn6Mo3VN	≤0.05	≤0.90	4.00～7.00	≤0.030	≤0.030	20.50～24.00	9.50～12.00	1.50～3.00	≤0.75	0.10～0.30	V:0.10～0.30
	2	H10Cr17Ni8Mn8Si4N	≤0.10	3.40～4.50	7.00～9.00	≤0.030	≤0.030	16.00～18.00	8.00～9.00	≤0.75	≤0.75	0.08～0.18	
	3	H05Cr20Ni6Mn9N	≤0.05	≤1.00	8.00～10.00	≤0.030	≤0.030	19.00～21.50	5.50～7.00	≤0.75	≤0.75	0.10～0.30	
	4	H05Cr18Ni5Mn12N	≤0.05	≤1.00	10.50～13.50	≤0.030	≤0.030	17.00～19.00	4.00～6.00	≤0.75	≤0.75	0.10～0.30	
	5	H10Cr21Ni10Mn6	≤0.10	0.20～0.60	5.00～7.00	≤0.030	≤0.030	20.00～22.00	9.00～11.00	≤0.75	≤0.75		
	6	H09Cr21Ni9Mn4Mo	0.04～0.14	0.30～0.65	3.30～4.75	≤0.030	≤0.030	19.50～22.00	8.00～10.70	0.50～1.50	≤0.75		
	7	H08Cr21Ni10Si	≤0.08	0.30～0.65	1.00～2.50	≤0.030	≤0.030	19.50～22.00	9.00～11.00	≤0.75	≤0.75		
	8	H08Cr21Ni10	≤0.08	≤0.35	1.00～2.50	≤0.030	≤0.030	19.50～22.00	9.00～11.00	≤0.75	≤0.75		
	9	H06Cr21Ni10	0.04～0.08	0.30～0.65	1.00～2.50	≤0.030	≤0.030	19.50～22.00	9.00～11.00	≤0.50	≤0.75		
	10	H03Cr21Ni10Si	≤0.030	0.30～0.65	1.00～2.50	≤0.030	≤0.030	19.50～22.00	9.00～11.00	≤0.75	≤0.75		
	11	H03Cr21Ni10	≤0.030	≤0.35	1.00～2.50	≤0.030	≤0.030	19.50～22.00	9.00～11.00	≤0.75	≤0.75		
	12	H08Cr20Ni11Mo2	≤0.08	0.30～0.65	1.00～2.50	≤0.030	≤0.030	18.00～21.00	9.00～12.00	2.00～3.00	≤0.75		
	13	H04Cr20Ni11Mo2	≤0.04	0.30～0.65	1.00～2.50	≤0.030	≤0.030	18.00～21.00	9.00～12.00	2.00～3.00	≤0.75		

续表

类型	序号	牌号	化学成分(质量分数,熔炼分析)/%[①]										
			C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	N	其他
奥氏体型	14	H08Cr21Ni10Si1	≤0.08	0.65～1.00	1.00～2.50	≤0.030	≤0.030	19.50～22.00	9.00～11.00	≤0.75	≤0.75		
	15	H03Cr21Ni10Si1	≤0.030	0.65～1.00	1.00～2.50	≤0.030	≤0.030	19.50～22.00	9.00～11.00	≤0.75	≤0.75		
	16	H12Cr24Ni13Si	≤0.12	0.30～0.65	1.00～2.50	≤0.030	≤0.030	23.00～25.00	12.00～14.00	≤0.75	≤0.75		
	17	H12Cr24Ni13	≤0.12	≤0.35	1.00～2.50	≤0.030	≤0.030	23.00～25.00	12.00～14.00	≤0.75	≤0.75		
	18	H03Cr24Ni13Si	≤0.030	0.30～0.65	1.00～2.50	≤0.030	≤0.030	23.00～25.00	12.00～14.00	≤0.75	≤0.75		
	19	H03Cr24Ni13	≤0.030	≤0.35	1.00～2.50	≤0.030	≤0.030	23.00～25.00	12.00～14.00	≤0.75	≤0.75		
	20	H12Cr24Ni13Mo2	≤0.12	0.30～0.65	1.00～2.50	≤0.030	≤0.030	23.00～25.00	12.00～14.00	2.00～3.00	≤0.75		
	21	H03Cr24N113Mo2	≤0.030	0.30～0.65	1.00～2.50	≤0.030	≤0.030	23.00～25.00	12.00～14.00	2.00～3.00	≤0.75		
	22	H12Cr24Ni13Si1	≤0.12	0.65～1.00	1.00～2.50	≤0.030	≤0.030	23.00～25.00	12.00～14.00		≤0.75		
	23	H03Cr24Ni13Si1	≤0.030	0.65～1.00	1.00～2.50	≤0.030	≤0.030	23.00～25.00	12.00～14.00	≤0.5	≤0.75		
	24	H12Cr26Ni21Si	0.08～0.15	0.30～0.65	1.00～2.50	≤0.030	≤0.030	25.00～28.00	20.00～22.50	≤0.75	≤0.75		
	25	H12Cr26Ni21	0.08～0.15	≤0.35	1.00～2.50	≤0.030	≤0.030	25.00～28.00	20.00～22.50	≤0.75	≤0.75		

续表

类型	序号	牌号	化学成分(质量分数,熔炼分析)/%[①]										
			C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	N	其他
奥氏体型	26	H08Cr26Ni21	≤0.08	≤0.65	1.00～2.50	≤0.030	≤0.030	25.00～28.00	20.00～22.50	≤0.75	≤0.75		
	27	H08Cr19Ni12Mo2Si	≤0.08	0.30～0.65	1.00～2.50	≤0.030	≤0.030	18.00～20.00	11.00～14.00	2.00～3.00	≤0.75		
	28	H08Cr19Ni12Mo2	≤0.08	≤0.35	1.00～2.50	≤0.030	≤0.030	18.00～20.00	11.00～14.00	2.00～3.00	≤0.75		
	29	H06Cr19Ni12Mo2	0.04～0.08	0.30～0.65	1.00～2.50	≤0.030	≤0.030	18.00～20.00	11.00～14.00	2.00～3.00	≤0.75		
	30	H03Cr19Ni12Mo2Si	≤0.030	0.30～0.65	1.00～2.50	≤0.030	≤0.030	18.00～20.00	11.00～14.00	2.00～3.00	≤0.75		
	31	H03Cr19Ni12Mo2	≤0.030	≤0.35	1.00～2.50	≤0.030	≤0.030	18.00～20.00	11.00～14.00	2.00～3.00	≤0.75		
	32	H08Cr19Ni12Mo2Si1	≤0.08	0.65～1.00	1.00～2.50	≤0.030	≤0.030	18.00～20.00	11.00～14.00	2.00～3.00	≤0.75		
	33	H03Cr19Ni12Mo2Si1	≤0.030	0.65～1.00	1.00～2.50	≤0.030	≤0.030	18.00～20.00	11.00～14.00	2.00～3.00	≤0.75		
	34	H03Cr19Ni12Mo2Cu2	≤0.030	≤0.65	1.00～2.50	≤0.030	≤0.030	18.00～20.00	11.00～14.00	2.00～3.00	1.00～2.50		
	35	H08Cr19Ni14Mo3	≤0.08	0.30～0.65	1.00～2.50	≤0.030	≤0.030	18.50～20.50	13.00～15.00	3.00～4.00	≤0.75		
	36	H03Cr19Ni14Mo3	≤0.030	0.30～0.65	1.00～2.50	≤0.030	≤0.030	18.50～20.50	13.00～15.00	3.00～4.00	≤0.75		
	37	H08Cr19Ni12Mo2Nb	≤0.08	0.30～0.65	1.00～2.50	≤0.030	≤0.030	18.00～20.00	11.00～14.00	2.00～3.00	≤0.75		Nb[②]:8C～1.00
	38	H07Cr20Ni34Mo2Cu3Nb	≤0.07	≤0.60	≤2.50	≤0.030	≤0.030	19.00～21.00	32.00～36.00	2.00～3.00	3.00～4.00		Nb[②]:8C～1.00

续表

类型	序号	牌号	化学成分(质量分数,熔炼分析)/%[①]										
			C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	N	其他
奥氏体型	39	H02Cr20Ni34Mo2Cu3Nb	≤0.025	≤0.15	1.50～2.00	≤0.015	≤0.020	19.00～21.00	32.00～36.00	2.00～3.00	3.00～4.00		Nb[②]:8C～0.40
	40	H08Cr19Ni10Ti	≤0.08	0.30～0.65	1.00～2.50	≤0.030	≤0.030	18.50～20.50	9.00～10.50	≤0.75	≤0.75		Ti:9C～1.00
	41	H21Cr16Ni35	0.18～0.25	0.30～0.65	1.00～2.50	≤0.030	≤0.030	15.00～17.00	34.00～37.00	≤0.75	≤0.75		
	42	H08Cr20Ni10Nb	≤0.08	0.30～0.65	1.00～2.50	≤0.030	≤0.030	19.00～21.50	9.00～11.00	≤0.75	≤0.75		Nb[②]:10C～1.00
	43	H08Cr20Ni10SiNb	≤0.08	0.65～1.00	1.00～2.50	≤0.030	≤0.030	19.00～21.50	9.00～11.00	≤0.75	≤0.75		Nb[②]:10C～1.00
	44	H02Cr27Ni32Mo3Cu	≤0.025	≤0.50	1.00～2.50	≤0.020	≤0.030	26.50～28.50	30.00～33.00	3.20～4.20	0.70～1.50		
	45	H02Cr20Ni25Mo4Cu	≤0.025	≤0.50	1.00～2.50	≤0.020	≤0.030	19.50～21.50	24.00～26.00	4.20～5.20	1.20～2.00		
	46	H06Cr19Ni10TiNb	0.04～0.08	0.30～0.65	1.00～2.00	≤0.030	≤0.030	18.50～20.00	9.00～11.00	≤0.25	≤0.75		Ti≤0.05 Nb[②]≤0.05
	47	H10Cr16Ni8Mo2	≤0.10	0.30～0.65	1.00～2.00	≤0.030	≤0.030	14.50～16.50	7.50～9.50	1.00～2.00	≤0.75		

续表

类型	序号	牌号	化学成分(质量分数,熔炼分析)/%[①]										
			C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	N	其他
奥氏体+铁素体型	48	H03Cr22Ni8Mo3N	≤0.030	≤0.90	0.50～2.00	≤0.030	≤0.030	21.50～23.50	7.50～9.50	2.50～3.50	≤0.75	0.08～0.20	
	49	H04Cr25Ni5Mo3Cu2N	≤0.04	≤1.00	≤1.50	≤0.040	≤0.030	24.00～27.00	4.50～6.50	2.90～3.90	1.50～2.50	0.10～0.25	
	50	H15Cr30Ni9	≤0.15	0.30～0.65	1.00～2.50	≤0.030	≤0.030	28.00～32.00	8.00～10.50	≤0.75	≤0.75		
马氏体型	51	H12Cr13	≤0.12	≤0.50	≤0.60	≤0.030	≤0.030	11.50～13.50	≤0.60	≤0.75	≤0.75		
	52	H06Cr12Ni4Mo	≤0.06	≤0.50	≤0.60	≤0.030	≤0.030	11.00～12.50	4.00～5.00	0.40～0.70	≤0.75		
	53	H31Cr13	0.25～0.40	≤0.50	≤0.60	≤0.030	≤0.030	12.00～14.00	≤0.60	≤0.75	≤0.75		
铁素体型	54	H06Cr14	≤0.06	0.30～0.70	0.30～0.70	≤0.030	≤0.030	13.00～15.00	≤0.60	≤0.75	≤0.75		
	55	H10Cr17	≤0.10	≤0.50	≤0.60	≤0.030	≤0.030	15.50～17.00	≤0.60	≤0.75	≤0.75		
	56	H01Cr26Mo	≤0.015	≤0.40	≤0.40	≤0.020	≤0.020	25.00～27.50	Ni+Cu ≤0.50	0.75～1.50	Ni+Cu ≤0.50	≤0.015	
	57	H08Cr11Ti	≤0.08	≤0.80	≤0.80	≤0.030	≤0.030	10.50～13.50	≤0.60	≤0.50	≤0.75		Ti:10C～1.50
	58	H08Cr11Nb	≤0.08	≤1.00	≤0.80	≤0.040	≤0.030	10.50～13.50	≤0.60	≤0.50	≤0.75		Nb[②]:10C～0.75
沉淀硬化型	59	H05Cr17Ni4Cu4Nb	≤0.05	≤0.75	0.25～0.75	≤0.030	≤0.030	16.00～16.75	4.50～5.00	≤0.75	3.25～4.00		Nb[②]:0.15～0.30

① 在对表中给出元素进行分析时，如果发现有其他元素存在，其总量（除铁外）不应超过0.50%。

② Nb可报告为Nb+Ta。

表 2-18　奥氏体不锈钢钨极惰性气体焊用焊丝选用[6]

母材	S30408	S30403	S32168	S32608	S31603
焊丝	H0Cr21Ni10	H00Cr21Ni10	H08Cr20Ni10Nb	H08Cr19Ni12Mo	H03Cr19Ni12Mo
母材	S31688	S31708	S30908	S31008	
焊丝	H03Cr19Ni12Mo2Cu2	H08Cr19Ni14Mo3	H08Cr26Ni21	H08Cr26Ni21	

表 2-19　不同牌号奥氏体不锈钢之间的钨极惰性气体焊用焊丝选用[6]

母材	S30403	S30808	S31008	S31608	S31603	S31708	S32168
S30408	H03Cr21Ni10	H08Cr21Ni10 H12Cr24Ni13	H08Cr21Ni10 H08Cr26Ni21	H08Cr21Ni10 H08Cr19Ni12Mo2	H08Cr21Ni10 H03Cr19Ni12Mo2	H08Cr21Ni10 H03Cr19Ni12Mo2 H08Cr19Ni14Mo3	H08Cr21Ni10
S30403		H08Cr21Ni10 H12Cr24Ni13	H03Cr21Ni10 H08Cr26Ni21	H03Cr21Ni10 H08Cr19Ni12Mo2	H03Cr21Ni10 H03Cr19Ni12Mo2	H08Cr21Ni10 H08Cr19Ni12Mo2 H08Cr19Ni14Mo3	H03Cr21Ni10 H08Cr20Ni10Nb
S30908			H12Cr24Ni13 H08Cr26Ni21	H12Cr24Ni23 H08Cr19Ni12Mo2	H12Cr24Ni13 H03Cr19Ni12Mo2	H12Cr24Ni13 H08Cr19Ni12Mo2	H12Cr24Ni13 H08Cr20Ni10Nb
S31008				H08Cr19Ni12Mo2	H03Cr19Ni12Mo2	H08Cr19Ni14Mo3	H08Cr20Ni10Nb H08Cr26Ni21
S31608					H03Cr19Ni12Mo2	H08Cr19Ni12Mo2 H08Cr19Ni14Mo3	H08Cr20Ni10Nb H08Cr19Ni12Mo2
S31603						H03Cr19Ni12Mo2 H08Cr19Ni14Mo3	H03Cr19Ni12Mo2
S31708							H08Cr19Ni14Mo3 H08Cr20Ni10Nb

表 2-20 各牌号实心不锈钢焊丝的主要用途

序号	牌号	主要用途
1	H05Cr22Ni11Mn6Mo3VN	常用于焊接同牌号的不锈钢，也可以用于不同种类合金及低碳钢与不锈钢的焊接。用作熔化极气体保护焊丝可直接在碳钢上进行堆焊，形成具有较高强韧性和良好抗晶间腐蚀能力的耐腐蚀保护层
2	H10Cr17Ni8Mn8Si4N	常用于焊接同牌号的不锈钢，也可以用于低碳钢与不锈钢等不同钢种的焊接。与 08Cr19Ni9 类钢比较，该种焊丝的熔敷层具有更好的强韧性和耐磨性，常用作低碳钢的堆焊材料
3	H05Cr20Ni6Mn9N	常用于焊接同牌号的不锈钢，也可以用于低碳钢与不锈钢等不同钢种的焊接。该焊丝使用性能与前两种相似，主要用作熔化极气体保护焊丝，不适宜用作钨极气体保护焊、等离子弧焊和电子束焊的充填焊丝
4	H05Cr18Ni5Mn12N	常用于焊接同牌号的不锈钢，用途和使用性能与 H05Cr20Ni6Mn9N 相似，只是熔敷层的耐蚀性稍差，而耐磨性能更好
5	H10Cr21Ni10Mn6	用途同 H05Cr22Ni11Mn6Mo3VN 焊丝，具有良好的强韧性和优良的抗磨性能，主要用于耐磨高锰钢的焊接和碳钢的表面堆焊
6	H09Cr21Ni9Mn4Mo	主要用于不同种钢的焊接，如奥氏体锰钢与碳钢锻件或铸件的焊接。焊缝强度适中，但具有良好的抗裂性能
7	H08Cr21Ni10Si H08Cr21Ni10	用于 18-8 型、18-12 型和 20-10 型奥氏体不锈钢的焊接，是 08Cr19Ni9(304)型不锈钢最常用的焊接材料
8	H06Cr21Ni10	除碳含量控制在上限外，其他成分与 H08Cr21Ni10 相同。由于碳量较高，焊缝在高温条件下具有较高的抗拉强度和较好的抗蠕变性能。常用于焊接 07Cr19Ni9(304H)
9	H03Cr21Ni10Si H03Cr21Ni10	除碳含量较低外，其他成分与 H08Cr21Ni10 相同。由于碳含量较低，不至于在晶间产生碳化物析出，其抗晶间腐蚀能力与含铌或钛等稳定化元素的钢相似，但高温强度稍低
10	H08Cr20Ni11Mo2	除钼含量较高外，其他成分与 H03Cr21Ni10 基本相同。常用于焊接铬、镍、钼含量相近的铸件；在希望焊缝中铁素体含量较高条件下，也可用于 07Cr17Ni12Mo2(316)锻件的焊接
11	H04Cr20Ni11Mo2	除碳含量较低外，其他成分与 H08Cr20Ni11Mo2 相同。常用于焊接铬、镍、钼含量相近的铸件；在希望焊缝中铁素体含量较高时，也可用于 03Cr17Ni12Mo2(316L)锻件的焊接
12	H08Cr21Ni10Si1 H03Cr21Ni10Si1	除硅含量较高外，其他成分与 H08Cr21Ni10 和 H03Cr21Ni10 相同。在气体保护焊接过程中，硅能改善焊缝钢水的流动性和浸润性，使得焊缝光滑、平整。如果焊缝被母材稀释生成低铁素体或纯奥氏体组织，则焊缝裂纹敏感性要比用低硅焊丝高

续表

序号	牌号	主要用途
13	H12Cr24Ni13Si H12Cr24Ni13	用于焊接成分相似的锻件和铸件，也可以用于不同类别金属的焊接，如 08Cr19Ni9 不锈钢与碳钢的焊接；常用于 08Cr19Ni9 复合钢板的复层焊接，以及碳钢壳体内衬不锈钢薄板的焊接
14	H03Cr24Ni13Si H03Cr24Ni13	除碳含量较低外，其他成分与 H12Cr24Ni13Si 和 H12Cr24Ni13 相同。由于碳含量较低，不至于在晶间产生碳化物析出，其抗晶间腐蚀能力与含铌或钛等稳定化元素的钢相似，但高温强度稍低
15	H12Cr24Ni13Mo2	除含钼 2.0%～3.0%外，其他成分与 H12Cr24Ni13 相同。因为钼能提高钢在含卤化物气氛中的抗点腐蚀的能力，该焊丝主要用于钢材表面堆焊，作为 H08Cr19Ni12Mo2 或 H08Cr19Ni14Mo3 填充金属多层堆焊的第一层堆焊，以及在碳钢壳体中含钼不锈钢内衬的焊接、含钼不锈钢复合钢板与碳钢或 08Cr19Ni9 不锈钢的连接
16	H03Cr24Ni13Mo2	除碳含量较低外，其他成分与 H12Cr24Ni13Mo2 相同，其抗晶间腐蚀能力优于 H12Cr24Ni13Mo2。在表面多层堆焊时，为保证后续堆焊层有较低的含碳量，第一层通常采用低碳的 H03Cr24Ni13Mo2 焊丝
17	H12Cr24Ni13Si1 H03Cr24Ni13Si1	除硅含量提高到 0.65%～1.00%外，其他成分与 H12Cr24Ni13Si 和 H03Cr24Ni13Si 相同。在气体保护焊接过程中，硅能改善焊缝钢水的流动性和浸润性，使得焊缝光滑、平整，如果焊缝被母材稀释生成低铁素体或纯奥氏体组织，则焊缝裂纹敏感性要比用低硅焊丝高
18	H12Cr26Ni21Si H12Cr26Ni21	该牌号具有良好的耐热和耐腐蚀性能，常用于焊接 25-20(310)型不锈钢
19	H08Cr19Ni12Mo2Si H08Cr19Ni12Mo2	牌号中含有 2.0%～3.0%的钼，因而钢具有良好的抗点腐蚀能力，在高温下抗蠕变性能也显著提高。常用于焊接在高温下工作或在含有氯离子气氛中工作的 07Cr17Ni12Mo2 不锈钢
20	H06Cr19Ni12Mo2	除碳含量控制在上限外，其他成分与 H08Cr19Ni12Mo2 相同，但其高温抗拉强度有所提高。主要用于焊接 07Cr17Ni12Mo2(316H)不锈钢
21	H03Cr19Ni12Mo2Si H03Cr19Ni12Mo2	除碳含量较低外，其他成分与 H08Cr19Ni12Mo2 相同，主要用于焊接超低碳含钼奥氏体不锈钢及合金。因为碳含量低，在不采用钛、铌等稳定化元素的条件下，焊缝具有良好的抗晶间腐蚀性能，但高温抗拉强度低于含钛、铌的焊缝
22	H08Cr19Ni12Mo2Si1 H03Cr19Ni12Mo2Si1	除硅含量提高到 0.65%～1.00%外，其他成分与 H08Cr19Ni12Mo2Si1 和 H03Cr19Ni12Mo2Si1 相同。用于熔化极气体保护焊中，可改善充填金属的工艺性，如果焊缝被母材稀释生成低铁素体或纯奥氏体组织，则焊缝裂纹敏感性要比用低硅焊丝高
23	H03Cr19Ni12Mo2Cu2	牌号中含有 1.0%～2.5%的铜，其耐腐蚀和耐点蚀性能优于 H03Cr19Ni12Mo2。主要用于焊接耐硫酸腐蚀的容器、管道及结构件
24	H08Cr19Ni14Mo3	该牌号耐点蚀、缝隙腐蚀和抗蠕变性能优于 H08Cr19Ni12Mo2。常用于焊接 08Cr19Ni13Mo3 不锈钢和成分相似的合金，在点腐蚀和缝隙腐蚀比较严重的环境中工作

续表

序号	牌号	主要用途
25	H03Cr19Ni14Mo3	在不添加钛或铌等稳定化元素的情况下，通过降低碳含量，提高钢的抗晶间腐蚀能力
26	H08Cr19Ni12Mo2Nb	通过添加铌来稳定碳，防止晶间析出碳化铬，提高钢的抗晶间腐蚀能力。用于焊接成分相似的不锈钢
27	H07Cr20Ni34Mo2Cu3Nb	用于焊接成分相似的合金，通常焊件均用于腐蚀性较强的气氛或介质中，如含硫酸、亚硫酸及其盐类。因为含有稳定化元素铌，用该焊丝焊接的铸件和锻件，焊后可以不进行热处理
28	H02Cr20Ni34Mo2Cu3Nb	该牌号的基本成分与 H07Cr20Ni34Mo2Cu3Nb 相同，但碳、硅、磷、硫的含量比较低，对铌和锰含量控制也比较严，因而可以在不降低抗晶间腐蚀性能的前提下，大幅度减少纯奥氏体焊缝的热裂纹和刀状腐蚀裂纹。焊丝用于成分相似的合金的钨极气体保护焊、熔化极气体保护焊及埋弧焊，但采用埋弧焊时，焊缝容易产生热裂纹。焊缝抗拉强度比用 H07Cr20Ni34Mo2Cu3Nb 焊接时低
29	H08Cr19Ni10Ti	通过添加钛来稳定碳，防止晶间析出碳化铬，提高钢的抗晶间腐蚀能力，用于焊接成分相似的不锈钢。该焊丝宜采用惰性气体保护焊，不宜采用埋弧焊。因为埋弧焊极易造成焊缝中钛的流失
30	H21Cr16Ni35	用于焊接在 980℃以上工作的耐热和抗氧化部件，因为镍含量高，不适宜焊接在高硫气氛中工作的部件。最常见的用途是焊接成分相似的铸件和锻件，或用于合金铸件缺陷的补焊
31	H08Cr20Ni10Nb	通过添加铌来稳定碳，防止晶间析出碳化铬，提高钢的抗晶间腐蚀能力，用于焊接成分相似的不锈钢。如果焊缝被母材稀释生成低铁素体或纯奥氏体组织，则焊缝裂纹敏感性明显升高
32	H08Cr20Ni10SiNb	除硅含量提高到 0.65%～1.00%外，其他成分与 H08Cr20Ni10Nb 相同。用于熔化极气体保护焊中，可改善充填金属的工艺性，如果焊缝被母材稀释生成低铁素体或纯奥氏体组织，则焊缝裂纹敏感性要比用低硅焊丝高
33	H02Cr27Ni32Mo3Cu	用于焊接铁镍基高温合金和成分相近的不锈钢，通常在硫酸和磷酸介质中使用。为减少焊缝中的热裂纹和刀状腐蚀裂纹，应将焊丝中的碳、硅、磷、硫控制在规定的较低范围内
34	H02Cr20Ni25Mo4Cu	主要用于焊接装运硫酸或装运含有氯化物介质的容器，也可用于 03Cr19Ni14Mo3 型不锈钢的焊接。为减少焊缝中的热裂纹和刀状腐蚀裂纹，应将焊丝中的碳、硅、磷、硫控制在规定的较低范围内
35	H06Cr19Ni10TiNb	该焊丝成分与 H06Cr21Ni10 相似，只是对铬、钼含量加以限制，同时添加适量钛和铌，目的是控制焊缝中铁素体含量，降低在高温下长期使用过程中的 σ 相的析出，防止焊缝变脆。为保持相平衡，焊接过程中要采取相应措施，防止增铬与铬的烧损
36	H10Cr16Ni8Mo2	主要用于 08Cr16Ni8Mo2、07Cr17Ni12Mo2(316)和 08Cr18Ni12Nb(347)型高温、高压不锈钢管的焊接。因为焊缝中一般含有不高于 5%(体积比)的铁素体，焊缝具有良好的热塑性，即使在应力作用下，也不会产生热裂纹和弧坑裂纹，焊缝可在焊态或固溶状态下使用。在某些介质中 H12Cr16Ni8Mo2 焊缝的耐蚀性能不如 07Cr17Ni12Mo2，此时应选用耐蚀性能更好的焊丝

续表

序号	牌号	主要用途
37	H03Cr22Ni8Mo3N	主要用于焊接 03Cr22Ni6Mo3N 等含有 22%铬的双相不锈钢。因为焊缝为奥氏体-铁素体两相组织，具有抗拉强度高、抗应力腐蚀能力强、抗点蚀性能显著改善等优点
38	H04Cr25Ni5Mo3Cu2N	主要用于焊接含有 25%铬的双相不锈钢。焊缝具有奥氏体-铁素体双相不锈钢的全部优点
39	H15Cr30Ni9	常用于焊接成分相似的铸造合金，也可以用于碳钢和不锈钢（特别是高镍不锈钢）的焊接。因焊丝的铁素体形成元素含量高，即使焊缝金属被母材（高镍）稀释，焊丝中仍能保持较高的铁素体含量，焊缝仍具有很强的抗裂纹能力
40	H12Cr13	常用于焊接成分相似的合金，也可以用于碳钢表面堆焊，以获得耐腐蚀、抗点蚀的耐磨层。焊前应对焊件进行预热，焊后应进行热处理
41	H06Cr12Ni14Mo	主要用于焊接 08Cr13Ni4Mo 铸件和各种规格的 15Cr13、08Cr13 和 08Cr13Al 不锈钢。该焊丝通过降铬和加镍来限制焊缝产生铁素体。为防止显微组织中未回火马氏体重新硬化，焊后热处理温度不宜超过 620℃
42	H31Cr13	除碳含量较高外，其他成分与 H12Cr13 相似，主要用于 12%铬钢的表面堆焊，其熔敷层硬度更高，耐磨性更好
43	H06Cr14	用于焊接 08Cr13 型不锈钢，焊缝韧性较好，有一定的耐腐性能，焊接前后无需预热和热处理
44	H10Cr17	用于焊接 12Cr17 型不锈钢，焊缝具有良好的抗腐蚀性能，经热处理后能保持足够的韧性。焊接过程中，通常要求预热和焊后热处理
45	H01Cr26Mo	该牌号为超纯铁素体焊丝，主要用于超纯铁素体不锈钢的惰性气体保护焊。焊接过程中应充分注意焊件的清洁和保护气体的有效使用，防止焊缝被氧和氮污染
46	H08Cr11Ti	用于焊接同类不锈钢或不同种类的低碳钢材。焊缝中因含有稳定化元素钛，改善钢的抗晶间腐蚀性能，抗拉强度也有所提高，目前主要用于汽车尾气排放部件的焊接
47	H08Cr11Nb	以铌代钛，用途同 H08Cr11Ti。因为铌在电弧下氧化烧损很少，可以更精确地控制焊缝成分
48	H05Cr17Ni4Cu4Nb	用于焊接 07Cr17Ni4Cu4Nb 和其他类型的沉淀硬化型不锈钢。焊丝成分经调整后，可以防止焊缝中产生有害的网状铁素体组织。根据焊缝尺寸和使用条件，焊件可在焊态、焊态加沉淀硬化态或焊态加固溶处理加沉淀硬化态使用

表 2-21　YB/T 5092 与 GB/T 29713 两标准所规定的不锈钢焊丝的关系

类型	标准	牌号（型号）	化学成分(质量分数)/%										
			C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	N	其他
奥氏体	YB/T GB/T	H05Cr22Ni11Mn6Mo3VN	≤0.05	≤0.90	4.00～7.00	≤0.030	≤0.030	20.50～24.00	9.50～12.00	1.50～3.00	≤0.75	0.10～0.30	V:0.10～0.30
		209	0.05	0.90	4.0～7.0	0.03	0.03	20.5～24.0	9.5～12.0	1.5～3.0	0.75	0.10～0.30	V:0.10～0.30
	YB/T GB/T	H10Cr17Ni8Mn8Si4N	≤0.10	3.40～4.50	7.00～9.00	≤0.030	≤0.030	16.00～18.00	8.00～9.00	≤0.75	≤0.75	0.08～0.18	
		218	0.10	3.5～4.5	7.0～9.0	0.03	0.03	16.0～18.0	8.0～9.0	0.75	0.75	0.08～0.18	—
	YB/T GB/T	H05Cr20Ni6Mn9N	≤0.05	≤1.00	8.00～10.00	≤0.030	≤0.030	19.00～21.50	5.50～7.00	≤0.75	≤0.75	0.10～0.30	
		219	0.05	1.00	8.0～10.0	0.03	0.03	19.0～21.5	5.5～7.0	0.75	0.75	0.10～0.30	—
	YB/T GB/T	H05Cr18Ni5Mn12N	≤0.05	≤1.00	10.50～13.50	≤0.030	≤0.030	17.00～19.00	4.00～6.00	≤0.75	≤0.75	0.10～0.30	
		240	0.05	1.00	10.5～13.5	0.03	0.03	17.0～19.0	4.0～6.0	0.75	0.75	0.10～0.30	—
	YB/T GB/T	H10Cr21Ni10Mn6	≤0.10	0.20～0.60	5.00～7.00	≤0.030	≤0.030	20.00～22.00	9.00～11.00	≤0.75	≤0.75		
	YB/T GB/T	H09Cr21Ni9Mn4Mo	0.04～0.14	0.30～0.65	3.30～4.75	≤0.030	≤0.030	19.50～22.00	8.00～10.70	0.50～1.50	≤0.75		
		307[②]	0.04～0.14	0.65	3.3～4.8	0.03	0.03	19.5～22.0	8.0～10.7	0.5～1.5	0.75	—	—
	GB/T	307Si[②]	0.04～0.14	0.65～1.00	6.5～8.0	0.03	0.03	18.5～22.0	8.0～10.7	0.75	0.75	—	—
	GB/T	307Mn[②]	0.20	1.2	5.0～8.0	0.03	0.03	17.0～20.0	1.0～10.0	0.5	0.5	—	—

续表

类型	标准	牌号（型号）	化学成分（质量分数）/%										
			C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	N	其他
奥氏体	YB/T GB/T	H08Cr21Ni10Si	≤0.08	0.30～0.65	1.00～2.50	≤0.030	≤0.030	19.50～22.00	9.00～11.00	≤0.75	≤0.75		
		308	0.08	0.65	1.0～2.5	0.03	0.03	19.5～22.0	9.0～11.0	0.75	0.75	—	—
	GB/T	H08Cr21Ni10	≤0.08	≤0.35	1.00～2.50	≤0.030	≤0.030	19.50～22.00	9.00～11.00	≤0.75	≤0.75		
	YB/T GB/T	H06Cr21Ni10	0.04～0.08	0.30～0.65	1.00～2.50	≤0.030	≤0.030	19.50～22.00	9.00～11.00	≤0.50	≤0.75		
		308H	0.04～0.08	0.65	1.0～2.5	0.03	0.03	19.5～22.0	9.0～11.0	0.50	0.75	—	—
	YB/T GB/T	H03Cr21Ni10Si	≤0.030	0.30～0.65	1.00～2.50	≤0.030	≤0.030	19.50～22.00	9.00～11.00	≤0.75	≤0.75		
		308L	0.03	0.65	1.0～2.5	0.03	0.03	19.5～22.0	9.0～11.0	0.75	0.75	—	—
	YB/T	H03Cr21Ni10	≤0.030	≤0.35	1.00～2.50	≤0.030	≤0.030	19.50～22.00	9.00～11.00	≤0.75	≤0.75		
	YB/T GB/T	H08Cr20Ni11Mo2	≤0.08	0.30～0.65	1.00～2.50	≤0.030	≤0.030	18.00～21.00	9.00～12.00	2.00～3.00	≤0.75		
		308Mo	0.08	0.65	1.0～2.5	0.03	0.03	18.0～21.0	9.0～12.0	2.0～3.0	0.75	—	—
	YB/T GB/T	H04Cr20Ni11Mo2	≤0.04	0.30～0.65	1.00～2.50	≤0.030	≤0.030	18.00～21.00	9.00～12.00	2.00～3.00	≤0.75		
		308LMo	0.03	0.65	1.0～2.5	0.03	0.03	18.0～21.0	9.0～12.0	2.0～3.0	0.75	—	—

续表

类型	标准	牌号（型号）	化学成分（质量分数）/%										
			C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	N	其他
奥氏体	YB/T GB/T	H08Cr21Ni10Si1	≤0.08	0.65～1.00	1.00～2.50	≤0.030	≤0.030	19.50～22.00	9.00～11.00	≤0.75	≤0.75		
		308Si	0.08	0.65～1.00	1.0～2.5	0.03	0.03	19.5～22.0	9.0～11.0	0.75	0.75	—	—
	YB/T GB/T	H03Cr21Ni10Si1	≤0.030	0.65～1.00	1.00～2.50	≤0.030	≤0.030	19.50～22.00	9.00～11.00	≤0.75	≤0.75		
		308LSi	0.03	0.65～1.00	1.0～2.5	0.03	0.03	19.5～22.0	9.0～11.0	0.75	0.75	—	—
	YB/T GB/T	H12Cr24Ni13Si	≤0.12	0.30～0.65	1.00～2.50	≤0.030	≤0.030	23.00～25.00	12.00～14.00	≤0.75	≤0.75		
		309	0.12	0.65	1.0～2.5	0.03	0.03	23.0～25.0	12.0～14.0	0.75	0.75	—	—
	YB/T	H12Cr24Ni13	≤0.12	≤0.35	1.00～2.50	≤0.030	≤0.030	23.00～25.00	12.00～14.00	≤0.75	≤0.75		
	YB/T GB/T	H03Cr24Ni13Si	≤0.030	0.30～0.65	1.00～2.50	≤0.030	≤0.030	23.00～25.00	12.00～14.00	≤0.75	≤0.75		
		309L	0.03	0.65	1.0～2.5	0.03	0.03	23.0～25.0	12.0～14.0	0.75	0.75	—	—
	GB/T	309LD③	0.03	0.65	1.0～2.5	0.03	0.03	21.0～24.0	10.0～12.0	0.75	0.75	—	—
	YB/T	H03Cr24Ni13	≤0.030	≤0.35	1.00～2.50	≤0.030	≤0.030	23.00～25.00	12.00～14.00	≤0.75	≤0.75		
	YB/T GB/T	H12Cr24Ni13Mo2	≤0.12	0.30～0.65	1.00～2.50	≤0.030	≤0.030	23.00～25.00	12.00～14.00	2.00～3.00	≤0.75		
		309Mo	0.12	0.65	1.0～2.5	0.03	0.03	23.0～25.0	12.0～14.0	2.0～3.0	0.75	—	—

刘政军　徐德昆　等编著

不锈钢焊接及质量控制

The Second Edition
第二版

BUXIUGANG HANJIE
JI ZHILIANG KONGZHI

化学工业出版社

续表

类型	标准	牌号（型号）	化学成分（质量分数）/%										
			C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	N	其他
奥氏体	YB/T GB/T	H08Cr26Ni21	≤0.08	≤0.65	1.00～2.50	≤0.030	≤0.030	25.00～28.00	20.00～22.50	≤0.75	≤0.75		
		S310S②	0.08	0.65	1.0～2.5	0.03	0.03	25.0～28.0	20.0～22.5	0.75	0.75	—	—
	GB/T	S310L②	0.03	0.65	1.0～2.5	0.03	0.03	25.0～8.0	20.0～22.5	0.75	0.75	—	—
	GB/T	S312	0.15	0.65	1.0～2.5	0.03	0.03	28.0～32.0	8.0～10.5	0.75	0.75	—	—
	YB/T GB/T	H08Cr19Ni12Mo2Si	≤0.08	0.30～0.65	1.00～2.50	≤0.030	≤0.030	18.00～20.00	11.00～14.00	2.00～3.00	≤0.75		
		316	0.08	0.65	1.0～2.5	0.03	0.03	18.0～20.0	11.0～14.0	2.0～3.0	0.75	—	—
	YB/T	H08Cr19Ni12Mo2	≤0.08	≤0.35	1.00～2.50	≤0.030	≤0.030	18.00～20.00	11.00～14.00	2.00～3.00	≤0.75		
	YB/T GB/T	H06Cr19Ni12Mo2	0.04～0.08	0.30～0.65	1.00～2.50	≤0.030	≤0.030	18.00～20.00	11.00～14.00	2.00～3.00	≤0.75		
		S316H	0.04～0.08	0.65	1.0～2.5	0.03	0.03	18.0～20.0	11.0～14.0	2.0～3.0	0.75	—	—
	YB/T GB/T	H03Cr19Ni12Mo2Si	≤0.030	0.30～0.65	1.00～2.50	≤0.030	≤0.030	18.00～20.00	11.00～14.00	2.00～3.00	≤0.75		
		S316L	0.03	0.65	1.0～2.5	0.03	0.03	18.0～20.0	11.0～14.0	2.0～3.0	0.75	—	—
	YB/T	H03Cr19Ni12Mo2	≤0.030	≤0.35	1.00～2.50	≤0.030	≤0.030	18.00～20.00	11.00～14.00	2.00～3.00	≤0.75		

续表

类型	标准	牌号（型号）	化学成分（质量分数）/%										
			C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	N	其他
奥氏体	YB/T GB/T	H08Cr19Ni12Mo2Si1	≤0.08	0.65～1.00	1.00～2.50	≤0.030	≤0.030	18.00～20.00	11.00～14.00	2.00～3.00	≤0.75		
		S316Si	0.08	0.65～1.00	1.0～2.5	0.03	0.03	18.0～20.0	11.0～14.0	2.0～3.0	0.75	—	—
	YB/T GB/T	H03Cr19Ni12Mo2Si1	≤0.030	0.65～1.00	1.00～2.50	≤0.030	≤0.030	18.00～20.00	11.00～14.00	2.00～3.00	≤0.75		
		S316LSi	0.03	0.65～1.00	1.0～2.5	0.03	0.03	18.0～20.0	11.0～14.0	2.0～3.0	0.75	—	—
	YB/T	H03Cr19Ni12Mo2Cu2	≤0.030	≤0.65	1.00～2.50	≤0.030	≤0.030	18.00～20.00	11.00～14.00	2.00～3.00	1.00～2.50		
	GB/T	316LCu	0.03	0.65	1.0～2.5	0.03	0.03	18.0～20.0	11.0～14.0	2.0～3.0	1.0～2.5	—	—
	GB/T	316LMn②	0.03	1.0	5.0～9.0	0.03	0.02	19.0～22.0	15.0～18.0	2.5～4.5	0.5	0.10～0.20	
	YB/T GB/T	H08Cr19Ni14Mo3	≤0.08	0.30～0.65	1.00～2.50	≤0.030	≤0.030	18.50～20.50	13.00～15.00	3.00～4.00	≤0.75	—	
		S317	0.08	0.65	1.0～2.5	0.03	0.03	18.5～20.5	13.0～15.0	3.0～4.0	0.75	—	—
	YB/T GB/T	H03Cr19Ni14Mo3	≤0.030	0.30～0.65	1.00～2.50	≤0.030	≤0.030	18.50～20.50	13.00～15.00	3.00～4.00	≤0.75		
		S317L	0.03	0.65	1.0～2.5	0.03	0.03	18.5～20.5	13.0～15.0	3.0～4.0	0.75	—	—
	YB/T GB/T	H08Cr19Ni12Mo2Nb	≤0.08	0.30～0.65	1.00～2.50	≤0.030	≤0.030	18.00～20.00	11.00～14.00	2.00～3.00	≤0.75		Nb①：8C～1.00
		S318	0.08	0.65	1.0～2.5	0.03	0.03	18.0～20.0	11.0～14.0	2.0～3.0	0.75	—	8C～1.0

续表

类型	标准	牌号（型号）	化学成分（质量分数）/%										
			C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	N	其他
奥氏体	GB/T	S318L	0.03	0.65	1.0～2.5	0.03	0.03	18.0～20.0	11.0～14.0	2.0～3.0	0.75	8C～1.0	—
	YB/T GB/T	H07Cr20Ni34Mo2Cu3Nb	≤0.07	≤0.60	≤2.50	≤0.030	≤0.030	19.00～21.00	32.00～36.00	2.00～3.00	3.00～4.00		Nb[①]:8C～1.00
		S320[②]	0.07	0.60	2.5	0.03	0.03	19.0～21.0	32.0～36.0	2.0～3.0	3.0～4.0	—	8C～1.0
	YB/T GB/T	H02Cr20Ni34Mo2Cu3Nb	≤0.025	≤0.15	1.50～2.00	≤0.015	≤0.020	19.00～21.00	32.00～36.00	2.00～3.00	3.00～4.00	—	Nb[①]:8C～0.40
		S320LR[②]	0.025	0.15	1.5～2.0	0.015	0.02	19.0～21.0	32.0 36.0	2.0～3.0	3.0～4.0	—	Nb:8C～0.40
	YB/T GB/T	H08Cr19Ni10Ti	≤0.08	0.30～0.65	1.00～2.50	≤0.030	≤0.030	18.50～20.50	9.00～10.50	≤0.75	≤0.75		Ti:9C～1.00
		S321	0.08	0.65	1.0～2.5	0.03	0.03	18.5～20.5	9.0～10.5	0.75	0.75	—	Ti:9C～1.0
	YB/T GB/T	H21Cr16Ni35	0.18～0.25	0.30～0.65	1.00～2.50	≤0.030	≤0.030	15.00～17.00	34.00～37.00	≤0.75	≤0.75		
		S330	0.18～0.25	0.65	1.0～2.5	0.03	0.03	15.0～17.0	34.0～37.0	0.75	0.75	—	—
	YB/T GB/T	H08Cr20Ni10Nb	≤0.08	0.30～0.65	1.00～2.50	≤0.030	≤0.030	19.00～21.50	9.00～11.00	≤0.75	≤0.75	—	Nb[①]:10C～1.00
		S347	0.08	0.65	1.0～2.5	0.03	0.03	19.0～21.5	9.0～11.0	0.75	0.75	—	Nb:10C～1.00
	YB/T GB/T	H08Cr20Ni10SiNb	≤0.08	0.65～1.00	1.00～2.50	≤0.030	≤0.030	19.00～21.50	9.00～11.00	≤0.75	≤0.75	—	Nb[①]:10C～1.00
		S347Si	0.08	0.65～1.00	1.0～2.5	0.03	0.03	19.0～21.5	9.0～11.0	0.75	0.75	—	Nb:10C～1.00

续表

类型	标准	牌号（型号）	化学成分（质量分数）/%										
			C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	N	其他
奥氏体	GB/T	S347L	0.03	0.65	1.0～2.5	0.03	0.03	19.0～21.5	9.0～11.0	0.75	0.75	—	Nb：10C～1.00
	YB/T GB/T	H02Cr27Ni32Mo3Cu	≤0.025	≤0.50	1.00～2.50	≤0.020	≤0.030	26.50～28.50	30.00～33.00	3.20～4.20	0.70～1.50		
		S383②	0.025	0.50	1.0～2.5	0.02	0.03	26.5～28.5	30.0～33.0	3.2～4.2	0.7～1.5	—	—
	YB/T GB/T	H02Cr20Ni25Mo4Cu	≤0.025	≤0.50	1.00～2.50	≤0.020	≤0.030	19.50～21.50	24.00～26.00	4.20～5.20	1.20～2.00	—	—
		S385②	0.025	0.50	1.0～2.5	0.02	0.03	19.5～21.5	24.0～26.0	4.2～5.2	1.2～2.0	—	—
	YB/T GB/T	H06Cr19Ni10TiNb	0.04～0.08	0.30～0.65	1.00～2.00	≤0.030	≤0.030	18.50～20.00	9.00～11.00	≤0.25	≤0.75	—	Ti：≤0.05 Nb①：≤0.05
		S19-10H	0.04～0.08	0.65	1.0～2.0	0.03	0.03	18.5～20.0	9.0～11.0	0.25	0.75	—	Ti：≤0.05
	YB/T GB/T	H10Cr16Ni8Mo2	≤0.10	0.30～0.65	1.00～2.00	≤0.030	≤0.030	14.50～16.50	7.50～9.50	1.00～2.00	≤0.75		
		S16-8-2	0.10	0.65	1.0～2.5	0.03	0.03	14.5～16.5	7.5～9.5	1.0～2.0	0.75	—	—
奥氏体＋铁素体	YB/T GB/T	H03Cr22Ni8Mo3N	≤0.030	≤0.90	0.50～2.00	≤0.030	≤0.030	21.50～23.50	7.50～9.50	2.50～3.50	≤0.75	0.08～0.20	
		S2209	0.03	0.90	0.5～2.0	0.03	0.03	21.5～23.5	7.5～9.5	2.5～3.5	0.75	0.08～0.20	
	YB/T GB/T	H04Cr25Ni5Mo3Cu2N	≤0.04	≤1.00	≤1.50	≤0.040	≤0.030	24.00～27.00	4.50～6.50	2.90～3.90	1.50～2.50	0.10～0.25	
		S2553	0.04	1.0	1.5	0.04	0.03	24.0～27.0	4.5～6.5	2.9～3.9	1.5～2.5	0.10～0.25	

续表

类型	标准	牌号（型号）	化学成分（质量分数）/%										
			C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	N	其他
奥氏体+铁素体	GB/T	S2594	0.03	1.0	2.5	0.03	0.02	24.0～27.0	8.0～10.5	2.5～4.5	1.5	0.20～0.30	W:1.0
	YB/T GB/T	H15Cr30Ni9	≤0.15	0.30～0.65	1.00～2.50	≤0.030	≤0.030	28.00～32.00	8.00～10.50	≤0.75	≤0.75		
		S312	0.15	0.65	1.0～2.5	0.03	0.03	28.0～32.0	8.0～10.5	0.75	0.75	—	—
马氏体	GB/T	S409	0.08	0.8	0.8	0.03	0.03	10.5～13.5	0.6	0.50	0.75	—	Ti:10C～1.5
	GB/T	S409Nb	0.12	0.5	0.6	0.03	0.03	10.5～13.5	0.6	0.75	0.75	8C～1.0	—
	YB/T GB/T	H12Cr13	≤0.12	≤0.50	≤0.60	≤0.030	≤0.030	11.50～13.50	≤0.60	≤0.75	≤0.75		
		S410	0.12	0.5	0.6	0.03	0.03	11.5～13.5	0.6	0.75	0.75	—	—
	YB/T GB/T	H06Cr12Ni4Mo	≤0.06	≤0.50	≤0.60	≤0.030	≤0.030	11.00～12.50	4.00～5.00	0.40～0.70	≤0.75		
		S410NiMo	0.06	0.5	0.6	0.03	0.03	11.0～12.5	4.0～5.0	0.4～0.7	0.75	—	—
	YB/T GB/T	H31Cr13	0.25～0.40	≤0.50	≤0.60	≤0.030	≤0.030	12.00～14.00	≤0.60	≤0.75	≤0.75		
		S420	0.25～0.40	0.5	0.6	0.03	0.03	12.0～14.0	0.75	0.75	0.75	—	—
铁素体	YB/T	H06Cr14	≤0.06	0.30～0.70	0.30～0.70	≤0.030	≤0.030	13.00～15.00	≤0.60	≤0.75	≤0.75		

续表

类型	标准	牌号（型号）	化学成分（质量分数）/%										
			C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	N	其他
铁素体	YB/T GB/T	H10Cr17	≤0.10	≤0.50	≤0.60	≤0.030	≤0.030	15.50～17.00	≤0.60	≤0.75	≤0.75		
	YB/T GB/T	S430	0.10	0.5	0.6	0.03	0.03	15.5～17.0	0.6	0.75	0.75	—	—
	GB/T	S430Nb	0.10	0.5	0.6	0.03	0.03	15.5～17.0	0.6	0.75	0.75		8C～1.2
	GB/T	S430LNb	0.03	0.5	0.6	0.03	0.03	15.5～17.0	0.6	0.75	0.75		8C～1.2
	GB/T	S439	0.04	0.8	0.8	0.03	0.03	17.0～19.0	0.6	0.5	0.75	—	Ti:10C～1.1
	YB/T GB/T	H01Cr26Mo	≤0.015	≤0.40	≤0.40	≤0.020	≤0.020	25.00～27.50	Ni+Cu ≤0.50	0.75～1.50	Ni+Cu ≤0.50	≤0.015	
	YB/T GB/T	S446LMo	0.015	0.4	0.4	0.02	0.02	25.0～27.5	Ni+Cu:0.5	0.75～1.50	Ni+Cu:0.5	0.015	
	YB/T GB/T	H08Cr11Ti	≤0.08	≤0.80	≤0.80	≤0.030	≤0.030	10.50～13.50	≤0.60	≤0.50	≤0.75		Ti:10C～1.50
	YB/T GB/T	409	0.08	0.8	0.8	0.03	0.03	10.5～13.5	0.6	0.50	0.75	—	Ti:10C～1.5
	YB/T	H08Cr11Nb	≤0.08	≤1.00	≤0.80	≤0.040	≤0.030	10.50～13.50	≤0.60	≤0.50	≤0.75		Nb①:10C～0.75

续表

类型	标准	牌号（型号）	化学成分（质量分数）/%										
			C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	N	其他
沉淀硬化	YB/T GB/T	H05Cr17Ni4Cu4Nb	≤0.05	≤0.75	0.25～0.75	≤0.030	≤0.030	16.00～16.75	4.50～5.00	≤0.75	3.25～4.00		Nb①：0.15～0.30
		S630	0.05	0.75	0.25～0.75	0.03	0.03	16.00～16.75	4.5～5.0	0.75	3.25～4.00	0.15～0.30	—
	GB/T	S33-31	0.015	0.50	2.00	0.02	0.01	31.0～35.0	30.0～33.0	0.5～2.0	0.3～1.2	0.35～0.60	
	GB/T	S3556	0.05～0.15	0.20～0.80	0.50～2.00	0.04	0.015	21.0～23.0	19.0～22.5	2.5～4.0	—	0.30	④

① Nb 可报告为 Nb＋Ta。

② 熔敷金属在多数情况下是纯奥氏体，因此对微裂纹和热裂纹敏感。增加焊缝金属中的 Mn 含量可减少裂纹的发生，经供需双方协商，Mn 的范围可以扩大到一定等级。

③ 这些分类主要用于低稀释率的堆焊，如电渣焊带。

④ N：0.10～0.30，Co：16.0～21.0，W：2.0～3.5，Ta：0.30～1.25，Al：0.10～0.50，Zr：0.001～0.100，La：0.005～0.100，B：0.02。

注：1. 表中的 YB/T 是 YB/T 5092—2005《焊接用不锈钢焊丝》的缩写；表中的 GB/T 是 GB/T 29713—2013《不锈钢焊丝和焊带》的缩写。

2. GB/T 29713—2013《不锈钢焊丝和焊带》适用于熔化极气体保护电弧焊、非熔化极气体保护电弧焊、埋弧焊、电渣焊、等离子弧焊及激光焊等用不锈钢焊丝、填充丝及焊带。本表只列出焊丝型号（焊带型号与焊丝型号区别在于将字头“S”改为“B”）。

3. YB/T 5092—2005《焊接用不锈钢焊丝》适用于制作电焊条焊芯、气体保护焊、埋弧焊、电渣焊等焊接用不锈钢钢丝。

4. 凡是两标准所规定的焊丝化学成分相符或仅某个元素含量稍有差别的，将标准代号（YB/T、GB/T）列入同一单元格内，YB/T 5092 的焊丝牌号及化学成分居上；元素含量差别稍大的另行表述，并分别注明标准代号 YB/T 或 GB/T。

5. YB/T 5092—2005 标准的注释，在对表中给出元素进行分析时，如果发现有其他元素存在，其总量（除铁外）不应超过 0.50%。

6. GB/T 29713—2013 标准的注释，表中单值均为最大值；不超过 Nb 含量总量的 20%，可用 Ta 代替。

7. S2553 焊丝国内生产单位：林肯电气（锦州）焊接材料有限公司、江苏兴海特钢有限公司，焊丝规格有 0.8mm、1.0mm、1.2mm。S2554 焊丝国内生产单位：昆山京群焊材科技有限公司，焊丝规格有 0.8mm、1.0mm、1.2mm。

（2）埋弧焊用焊丝

埋弧焊时，焊缝化学成分和性能主要是由焊丝和焊剂共同来决定的。另外埋弧焊时焊接电流大，熔深大，母材金属熔合比高，故母材金属成分对焊缝的性能也有影响，所以焊接参数也会给焊缝化学成分和性能带来一定的影响。对埋弧焊用焊丝的选择，既要考虑焊剂成分的影响，又要考虑母材金属的影响。为了得到不同的焊缝金属化学成分，可以通过同一种焊剂（主要是熔炼焊剂）与几种不同成分的焊丝配合来实现；也可以通过用同一种焊丝与几种不同成分的焊剂（主要是烧结焊剂）的配合来实现。

焊接用不锈钢盘条的熔炼化学成分见表 2-17。焊接用不锈钢盘条的类别比较齐全，有奥氏体型、铁素体型和马氏体型不锈钢，其盘条直径为 5.5～12.0mm，可用来制作埋弧焊的焊丝。焊接用不锈钢焊丝与母材化学成分基本相近，只是焊丝的化学成分中铬、镍含量要比母材金属略高，而含碳量低于母材金属。这主要考虑到焊接过程中合金元素的烧损和提高焊接接头的耐腐蚀性能。焊接铁素体型不锈钢时，可采用 H06Cr14（H0Cr14）和 H10Cr17（H1Cr17）焊丝；焊接马氏体型不锈钢时，可采用 H12Cr13（H1Cr13）和 H1Cr5Mo 焊丝。焊接 18-8 型奥氏体不锈钢时，可采用 H08Cr21Ni10（H0Cr21Ni10）或 H08Cr20Ni10Nb 焊丝；对于超低碳 18-8 型不锈钢应采用 H03Cr21Ni10（H00Cr21Ni10）或 H03Cr19Ni12Mo2（H00Cr19Ni12Mo2）焊丝进行焊接。详见表 2-22。

表 2-22　埋弧焊用不锈钢焊丝及焊剂[7,8]

类别	钢号	焊剂型号	焊剂牌号及焊丝牌号	
奥氏体不锈钢	S30408 06Cr19Ni10	F308-H08Cr21Ni10	SJ601-H08Cr21Ni10 HJ260-H08Cr21Ni10	
	06Cr18Ni11Ti	F347-H08Cr20Ni10Nb	SJ641-H08Cr20Ni10Nb	
	06Cr17Ni12Mo2	F316-H06Cr19Ni12Mo2	SJ601-H06Cr19Ni12Mo2 HJ260-H06Cr19Ni12Mo2	
	06Cr17Ni12Mo2Ti	F316L-H03Cr19Ni12Mo2	SJ601-H03Cr19Ni12Mo2 HJ260-H03Cr19Ni12Mo2	
	06Cr19Ni13Mo3	F317-H08Cr19Ni14Mo3	SJ601-H08Cr19Ni14Mo3 HJ260-H08Cr19Ni14Mo3	
	022Cr19Ni10	F308L-H03Cr21Ni10	SJ601-H03Cr21Ni10 HJ260-H03Cr21Ni10	
	022Cr17Ni12Mo2	F316L-H03Cr19Ni12Mo2	SJ601-H03Cr19Ni12Mo2 HJ260-H03Cr19Ni12Mo2	
	06Cr19Ni13Mo3	F317-H08Cr19Ni14Mo3	SJ601-H08Cr19Ni14Mo3 HJ260-H08Cr19Ni14Mo3	
铁素体不锈钢	06Cr13 (0Cr13)	—	HJ150 HJ260 SJ601	H06Cr14 H12Cr24Ni13 H12Cr26Ni21
	10Cr17(1Cr17) 10Cr17Mo(1Cr17Mo)	—	SJ601 SJ608 SJ701 HJ172 HJ151	H10Cr17 H08Cr21Ni10 H12Cr24Ni13 H08Cr26Ni21

续表

类别	钢号	焊剂型号	焊剂牌号及焊丝牌号	
马氏体不锈钢	12Cr13(1Cr13) 20Cr13(2Cr13)	—	HJ151 HJ260 SJ601	H12Cr13 H06Cr14 H08Cr21Ni10 H12Cr24Ni13 H12Cr26Ni21
	14Cr17Ni2(1Cr17Ni2)	—	HJ151 HJ260 SJ601	H08Cr26Ni21 H12Cr26Ni21 H12Cr24Ni13

表 2-23 不锈钢棒直径及其允许偏差[10] mm

直径	直径允许偏差	直径	直径允许偏差
1.0	±0.03	2.6	±0.05
1.2	±0.03	3.2	±0.05
1.6	±0.05	4.0	±0.05
2.0	±0.05	5.0	±0.05
2.4	±0.05		

表 2-24 不锈钢丝直径及其允许偏差和椭圆度[10] mm

直径	允许偏差	椭圆度 不大于
0.8	±0.015	0.015
1.0	±0.020	0.020
1.2	±0.020	0.020
1.6	±0.020	0.020
2.0	±0.025	0.025
2.4	±0.025	0.025

表 2-25 不锈钢丝盘内径[10] mm

钢丝直径	钢丝盘内径 不小于
0.60～1.20	150
>1.20～2.00	250
>2.00～3.50	350
>3.50～6.00	500

MIG 焊是焊接不锈钢机械化程度较高的方法之一，适用于薄、中厚度不锈钢板的焊接。为了改善电弧特性，在 Ar 气中混入适量 O_2 或 CO_2，即成为 MAG 焊接方法。焊接超低碳不锈钢时不能采用 $\phi_{Ar}95\%+\phi_{CO_2}5\%$ 混合气体，只可采用 $\phi_{Ar}98\%+\phi_{O_2}2\%$ 混合气体。这是因为 CO_2 气的渗入，使焊缝增碳，不利于焊接接头的耐腐蚀性能。无论 MIG 焊，还是 MAG 焊，必须选用惰性气体保护焊接用钢丝。

我国与部分国家实心不锈钢焊丝对照见表 2-63。

2.2.2　药芯不锈钢焊丝

药芯焊丝也称粉芯焊丝，又称管状焊丝，它是一种很有发展前景的焊接材料。

（1）药芯焊丝的结构形式与制造方法

药芯焊丝按其横截面结构分为有缝焊丝和无缝焊丝两种，如图 2-1 所示。有缝焊丝按其截面形状不同，又可分为两类：一类是金属外皮没有进入到芯部材料中的管状焊丝；另一类是金属外皮进入到芯部材料中间，具有复杂截面形状的焊丝。有缝药芯的横截面类别有对接、搭接、T 形、E 形和双层等形状。

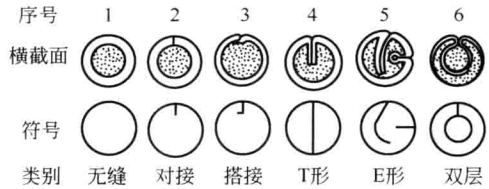


图 2-1　常见的药芯焊丝横截面类别

根据使用的金属外皮材料不同，药芯焊丝的制造方法有钢带法、盘圆法和钢管拔制法三种。钢带成形法是将钢带轧制成 U 形槽后，加入焊剂，再经轧制成 O 形，最后拉拔至相应直径。这种制造方法是目前最常见的，其特点是设备简单、成本低，可进行多种规格的生产。盘圆成形法是沿盘圆中心线纵向轧出槽沟，随后经多道轧制变形，获得厚度均匀的 U 形截面，然后加入焊剂并轧制拉拔至相应直径，其主要优点是原材料来源方便。钢管拔制法是无缝焊丝制造方法，这种焊丝具有能镀铜、耐吸潮、储存时间长和焊缝金属扩散氢低等优点，但是其装药技术难度大，制造成本较高。

常用药芯焊丝规格、断面形状及适用的焊接方法见表 2-26。

表 2-26　常用药芯焊丝规格、断面形状及适用的焊接方法[1]

焊丝直径/mm	断面形状	适用的焊接方法
1.0	圆形	手工气体保护焊(半自动)
1.2		
1.6		手工气体保护焊(半自动)
2.0		
2.4	圆形或复杂断面	气体保护焊(自动)、手工气体保护焊(半自动)
2.8	复杂断面	气体保护焊(自动)
3.2		

注：GB/T 3375—1994《焊接术语》中已无“半自动焊”术语，对焊接方法中有关半自动、自动焊作了新的定义，原半自动、自动焊实际上是指手工操作及机械化操作，而自动焊按目前说法，应指微机操作。

（2）药芯焊丝的分类

药芯焊丝根据其内层填料中有无造渣剂，分为药粉型（有造渣剂）焊丝和金属粉型（无造渣剂）焊丝两种。

有造渣剂的按照渣的碱度，可分为钛型（酸性渣）、钙钛型（中性或弱碱性渣）和钙型（碱性渣）的焊丝。钛型渣系的焊缝成形美观，可进行全位置焊接，电弧稳定，飞溅很少，焊接工艺性能优良，但焊缝的韧性和抗裂性能略差。钙型渣系的焊缝韧性和抗裂性能优良，而焊缝成形和焊接工艺性能稍差。钙钛型渣系介于上述两者之间。

无造渣剂药芯焊丝的焊接工艺性能类似于实心焊丝，其熔敷效率和抗裂性能优于有造渣

剂药芯焊丝。无造渣剂药芯成分中大部分是金属粉，还加入了特殊的稳弧剂，能保证焊接时造渣少，效率高、飞溅少和电弧稳定等特点。此外，它还具有焊缝扩散氢含量低的特点，能提高焊接接头的抗裂性能。据统计，采用无造渣剂药芯焊丝施焊时，其造渣量只有有造渣剂焊丝的1/3，所以不需除渣就可进行连续多层焊接（3～4层），可大大提高焊接生产效率。

各种药芯焊丝的焊接特性见表2-27。

表2-27 各种药芯焊丝的焊接特性[1]

项目		填充粉类型			
		钛型	钙钛型	氧化钙-氟化钙	金属粉型
工艺性能	焊道外观	美观	一般	稍差	一般
	焊道形状	平滑	稍凸	稍凸	稍凸
	电弧稳定性	良好	良好	良好	良好
	熔滴过渡	细小滴过渡	滴状过渡	滴状过渡	滴状过渡(低电流时短路过渡)
	飞溅	细小、极少	细小，少	粒大，多	细小，极少
	熔渣覆盖	良好	稍差	差	渣极少
	脱渣性	良好	稍差	稍差	稍差
	烟尘量	一般	稍多	多	少
焊缝性能	缺口韧性	一般	良好	优	良好
	扩散氢合金/(mL/100g)	2～10	2～6	1～4	1～3
	氧体积分数/10^{-6}	600～900	500～700	450～650	600～700
	抗裂性能	一般	良好	优	优
	X射线检测	良好	良好	良好	良好
	抗气孔性能	稍差	良好	良好	良好
熔敷效率/%		70～85	70～85	70～85	90～95

（3）不锈钢药芯焊丝可以像碳钢和低合金钢药芯焊丝一样，对不锈钢进行既简便又高效的焊接。不锈钢药芯焊丝的应用以MAG焊为主，进行MAG焊时具有如下特点。

① 合金成分的调整方便，对钢材适应性强。由于通过药芯过渡合金元素，易调整到所需要的化学成分，以适应被焊钢材的要求，满足对焊接接头的质量要求。实心焊丝从冶炼合金开始，工序多，能满足用量少而品种多的要求。但是有的合金实心焊丝拉拔性能差，很难拉拔成所需的焊丝。此时药芯焊丝更显现其独特的优点。

② 工艺性好。由于药芯焊丝中加入了稳弧剂，电弧燃烧稳定，熔滴呈滴状均匀过渡，故焊接时飞溅很少，且飞溅颗粒细小，在钢板上粘不牢，很容易清除。脱渣性良好，焊接质量好，焊缝表面有光泽，X射线检测合格率高。

③ 焊缝成形美观。在焊缝成形方面，熔渣起主要作用。实心焊丝施焊时焊缝依靠熔敷金属自身的流动性和表面张力形成焊缝，故表面形状不良。药芯焊丝焊接时，能形成一定数量的熔渣，大大改善熔池金属的表面性质，使之对母材金属的润湿性更好，这对形成良好的焊缝成形起着重要的作用。

④ 熔敷速度高于实心焊丝。采用药芯焊丝焊接时，由于焊丝断面上通电部分的面积比实心焊丝小，在同样的焊接电流下药芯焊丝的电流密度高，焊丝熔化速度大，熔敷速度高，与焊条电弧焊相比，熔敷速度可提高2～4倍，其熔敷效率高达90%（不锈钢焊条仅55%），

生产效率明显提高，经济性好。

⑤ 可采用大电流进行全位置焊接。对电流、电压的适应范围大，与实心焊丝 MAG 焊相比，焊接条件设定较为容易，易于进行半自动和自动化焊接；ϕ0.8mm、ϕ1.2mm、ϕ1.6mm 的细直径药芯不锈钢焊丝，解决了全位置焊接问题。在各种焊接位置下，药芯焊丝均可采用较大的焊接电流。如 ϕ1.2mm 药芯焊丝，其焊接电流可达 280A，此时仍能顺利地实现向下立焊。

⑥ 制造工艺复杂。对焊丝成形要求严格，填料要均匀，一次性投资要高于实心焊丝。

⑦ 焊缝金属的氧含量高。焊缝金属的氧含量同其他焊接方法相比相对较高。随着含氧量增高，焊缝金属的冲击韧性将下降。焊缝金属的氧大部分是以氧化物夹杂的形式弥散分布在晶格之间，这些氧化物夹杂一部分来自粉剂中的氧化物；另一部分是脱氧反应的产物。氧化物夹杂含量过高，也可能成为不锈钢焊接接头冷弯不合格的原因之一。焊缝中含氧量可随焊丝熔渣碱度的提高而降低，但碱度提高的同时会使熔渣黏度降低，从而影响焊丝的全位置焊接性。

(4) 不锈钢药芯焊丝型号、牌号、规格与应用

① 不锈钢药芯焊丝型号与牌号。列入 GB/T 17853—1999《不锈钢药芯焊丝》标准的有 33 个型号，我国的不锈钢药芯焊丝牌号有新、旧两个类型。旧类型是历史比较早的药芯焊丝厂家习惯使用的，其编制方法基本与不锈钢焊条牌号相同，只是牌号前的字母不同（如“Y”），用以区别焊条；新类型是新发展起来的药芯焊丝厂家习惯使用的，其编制方法基本与国家标准 GB/T 17853 相同，只是牌号前用不同的字母表示不同的厂家[11]。

我国不锈钢药芯焊丝的型号、熔敷金属的化学成分见表 2-28，不锈钢药芯焊丝的拉伸性能及焊后热处理要求见表 2-29，不锈钢药芯焊丝的选用见表 2-30～表 2-33。

我国的不锈钢药芯焊丝与 AWS A5.22—1995《耐腐蚀铬及铬镍钢用药芯焊丝》及其他国家不锈钢药芯焊丝的对应关系，见表 2-64。

② 不锈钢药芯焊丝规格。不锈钢用药芯焊丝有粗丝（直径 ϕ4.0mm、ϕ3.2mm 和 ϕ2.4mm）和细丝（直径 ϕ2.0mm、ϕ1.6mm、ϕ1.2mm 和 ϕ0.8mm）两种。直径 ϕ4.0mm、ϕ3.2mm 焊丝主要用于埋弧焊。直径 ϕ1.6mm、ϕ1.2mm 和 ϕ0.8mm 焊丝主要用于 MAG 焊。

③ 不锈钢药芯焊丝的应用。不锈钢药芯焊丝主要是用于 MAW 焊或自保护气体保护焊接。不锈钢药芯焊丝可以用来焊接不锈钢薄板、中厚板和厚板。自从 ϕ0.8mm、ϕ1.2mm、ϕ1.6mm 的细直径药芯不锈钢焊丝研制成功以来，解决了全位置焊接问题，使不锈钢药芯焊丝应用急剧增加，并出现了取代不锈钢焊条的趋势，甚至将逐步取代不锈钢实心焊丝。

目前国内外应用最广泛的是钛型不锈钢药芯焊丝（可全位置焊接）和金属粉型不锈钢药芯焊丝。钛型不锈钢药芯焊丝因其焊接工艺性优良，所以越来越受到焊工的欢迎。而金属粉型不锈钢药芯焊丝的韧性要比钛型不锈钢药芯焊丝好。由于金属粉型不锈钢药芯焊丝具有电弧柔软、焊道成形光滑和熔渣较少等特点，在全位置焊时可采用短路过渡或脉冲电弧，在很多场合下已开始逐步替代传统的实心焊丝 TIG 焊。在厚板焊接时，也可以大大减轻焊道的清渣工作。金属粉型不锈钢药芯焊丝的焊缝表面会有一些氧化，不太光亮。碱性不锈钢药芯焊丝由于熔渣黏度低，在全位置焊时易造成焊道熔融金属下坠，只适合平焊位置焊接。

(5) 保护气体

大部分不锈钢药芯焊丝采用的保护气体是 CO_2 或 Ar+(20～25)%CO_2 混合气。试验表明，随着 Ar 气比例的增加，导致气孔的敏感性增加，熔合不良，焊缝表面不美观等缺陷，故氩气体积分数 ψ_{Ar} 应控制在 80%以下。

表 2-28 我国不锈钢药芯焊丝的型号、熔敷金属的化学成分[11] %

型号	C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	P	S	Cu	Nb+Ta	N
E307T×-×	0.13	18.0～20.5	9.0～10.5	0.5～1.5	3.30～4.75	1.0	0.04	0.03	0.5	—	—
E308T×-×	0.08	18.0～21.0	9.0～11.0	0.5	0.5～2.5	1.0	0.04	0.03	0.5	—	—
E308LT×-×	0.04	18.0～21.0	9.0～11.0	0.5	0.5～2.5	1.0	0.04	0.03	0.5	—	—
E308HT×-×	0.04～0.08	18.0～21.0	9.0～11.0	0.5	0.5～2.5	1.0	0.04	0.03	0.5	—	—
E308MoT×-×	0.08	18.0～21.0	9.0～11.0	2.0～3.0	0.5～2.5	1.0	0.04	0.03	0.5	—	—
E308LMoT×-×	0.04	18.0～21.0	9.0～12.0	2.0～3.0	0.5～2.5	1.0	0.04	0.03	0.5	—	—
E309T×-×	0.10	22.0～25.0	12.0～14.0	0.5	0.5～2.5	1.0	0.04	0.03	0.5	—	—
E309LNbT×-×	0.04	22.0～25.0	12.0～14.0	0.5	0.5～2.5	1.0	0.04	0.03	0.5	0.70～1.00	—
E309LT×-×	0.04	22.0～25.0	12.0～14.0	0.5	0.5～2.5	1.0	0.04	0.03	0.5	—	—
E309MoT×-×	0.12	21.0～25.0	12.0～16.0	2.0～3.0	0.5～2.5	1.0	0.04	0.03	0.5	—	—
E309LMoT×-×	0.04	21.0～25.0	12.0～16.0	2.0～3.0	0.5～2.5	1.0	0.04	0.03	0.5	—	—
E309LNiMoT×-×	0.04	20.5～23.5	15.0～17.0	2.5～3.5	0.5～2.5	1.0	0.04	0.03	0.5	—	—
E310T×-×	0.20	25.0～28.0	20.0～22.5	0.5	1.0～2.5	1.0	0.03	0.03	0.5	—	—
E312T×-×	0.15	28.0～32.0	8.0～10.5	0.5	0.5～2.5	1.0	0.04	0.03	0.5	—	—
E316T×-×	0.08	17.0～20.0	11.0～14.0	2.0～3.0	0.5～2.5	1.0	0.04	0.03	0.5	—	—
E316LT×-×	0.04	17.0～20.0	11.0～14.0	2.0～3.0	0.5～2.5	1.0	0.04	0.03	0.5	—	—
E317LT×-×	0.04	18.0～21.0	12.0～14.0	3.0～4.0	0.5～2.5	1.0	0.04	0.03	0.5	—	—
E347T×-×	0.08	18.0～21.0	9.0～11.0	0.5	0.5～2.5	1.0	0.04	0.03	0.5	8C～1.0	—
E409T×-×	0.10	10.5～13.5	0.60	0.5	0.80	1.0	0.04	0.03	0.5	(Ti:10C～1.5)	—
E410T×-×	0.12	11.0～13.5	0.60	0.5	1.2	1.0	0.04	0.03	0.5	—	—
E410NiMoT×-×	0.06	11.0～12.5	4.0～5.0	0.40～0.70	1.0	1.0	0.04	0.03	0.5	—	—
E410NiTiT×-×	0.04	11.0～12.0	3.6～4.5	0.5	0.70	0.50	0.03	0.03	0.5	(Ti:10C～1.5)	—
E430T×-×	0.10	15.0～18.0	0.60	0.5	1.2	1.0	0.04	0.03	0.5	—	—
E502T×-×	0.10	4.0～6.0	0.40	0.45～0.65	1.2	1.0	0.04	0.03	0.5	—	—

续表

型号	C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	P	S	Cu	Nb+Ta	N
E505T×-×	0.10	8.0～10.5	0.40	0.85～1.20	1.2	1.0	0.04	0.03	0.5	—	—
E307T0-3	0.13	19.5～22.0	9.0～10.5	0.5～1.5	3.30～4.75	1.0	0.04	0.03	0.5	—	—
E308T0-3	0.08	19.5～22.0	9.0～11.0	0.5	0.5～2.5	1.0	0.04	0.03	0.5	—	—
E308LT0-3	0.03	19.5～22.0	9.0～11.0	0.5	0.5～2.5	1.0	0.04	0.03	0.5	—	—
E308HT0-3	0.04～0.08	19.5～22.0	9.0～11.0	0.5	0.5～2.5	1.0	0.04	0.03	0.5	—	—
E308MoT 0-3	0.08	18.0～21.0	9.0～11.0	2.0～3.0	0.5～2.5	1.0	0.04	0.03	0.5	—	—
E308LMoT0-3	0.03	18.0～21.0	9.0～12.0	2.0～3.0	0.5～2.5	1.0	0.04	0.03	0.5	—	—
E308HMoT0-3	0.07～0.12	19.0～21.5	9.0～10.7	1.8～2.4	1.25～2.25	0.25～0.80	0.04	0.03	0.5	—	—
E309T0-3	0.10	23.0～25.5	12.0～14.0	0.5	0.5～2.5	1.0	0.04	0.03	0.5	—	—
E309LT0-3	0.03	23.0～25.5	12.0～14.0	0.5	0.5～2.5	1.0	0.04	0.03	0.5	—	—
E309LNbT0-3	0.03	23.0～25.5	12.0～14.0	0.5	0.5～2.5	1.0	0.04	0.03	0.5	0.70～1.00	—
E309MoT0-3	0.12	21.0～25.0	12.0～16.0	2.0～3.0	0.5～2.5	1.0	0.04	0.03	0.5	—	—
E309LMoT0-3	0.04	21.0～25.0	12.0～16.0	2.0～3.0	0.5～2.5	1.0	0.04	0.03	0.5	—	—
E310T0-3	0.20	25.0～28.0	20.0～22.5	0.5	1.0～2.5	1.0	0.03	0.03	0.5	—	—
E312T0-3	0.15	28.0～32.0	8.0～10.5	0.5	0.5～2.5	1.0	0.04	0.03	0.5	—	—
E316T 0-3	0.08	18.0～20.5	11.0～14.0	2.0～3.0	0.5～2.5	1.0	0.04	0.03	0.5	—	—
E316LT0-3	0.03	18.0～20.5	11.0～14.0	2.0～3.0	0.5～2.5	1.0	0.04	0.03	0.5	—	—
E316LKT0-3	0.04	17.0～20.0	11.0～14.0	2.0～3.0	0.5～2.5	1.0	0.04	0.03	0.5	—	—
E317LT0-3	0.03	18.5～21.0	13.0～15.0	3.0～4.0	0.5～2.5	1.0	0.04	0.03	0.5	—	—
E347T0-3	0.08	19.0～21.5	9.0～11.0	0.5	0.5～2.5	1.0	0.04	0.03	0.5	8C～1.0	—
E409T0-3	0.10	10.5～13.5	0.60	0.5	0.80	1.0	0.04	0.03	0.5	(Ti:10C～1.5)	—
E410T0-3	0.12	11.0～13.5	0.60	0.5	1.0	1.0	0.04	0.03	0.5	—	—
E410NiMoT0-3	0.06	11.0～12.5	4.0～5.0	0.40～0.70	1.0	1.0	0.04	0.03	0.5	—	—
E410NiTiT0-3	0.04	11.0～12.0	3.6～4.5	0.5	0.70	0.50	0.03	0.03	0.5	(Ti:10C～1.5)	—
E430T0-3	0.10	15.0～18.0	0.60	0.5	1.0	1.0	0.04	0.03	0.5	—	—
E2209T0-×	0.04	21.0～24.0	7.5～10.0	2.5～4.0	0.5～2.0	1.0	0.04	0.03	0.5	—	0.08～2.0
E2553T0-×	0.04	24.0～27.0	8.5～10.5	2.9～3.9	0.5～1.5	0.75	0.04	0.03	1.5～2.5	—	0.10～0.20
E×××T×-G	不规定										
R308LT1-5	0.03	18.0～21.0	9.0～11.0	0.5	0.5～2.5	1.2	0.04	0.03	0.5	—	—
R309LT1-5	0.03	22.0～25.0	12.0～14.0	0.5	0.5～2.5	1.2	0.04	0.03	0.5	—	—
R316LT1-5	0.03	17.0～20.0	11.0～14.0	2.0～3.0	0.5～2.5	1.2	0.04	0.03	0.5	—	—
R347T1-5	0.08	18.0～21.0	9.0～11.0	0.5	0.5～2.5	1.2	0.04	0.03	0.5	8C～1.0	—

注：1. 表中单值均为最大值。

2. 除表中所列元素外，其他元素（Fe除外）总量不得超过0.50%。

表 2-29 不锈钢药芯焊丝的拉伸性能及焊后热处理要求[12]

型号	抗拉强度 R_m/MPa	伸长率 A/%	热处理
E307T×-×	590	30	—
E308T×-×	550	35	—
E308LT×-×	520	35	—
E308HT×-×	550	35	—
E308MoT×-×	550	35	—
E308LMoT×-×	520	35	—
E309T×-×	550	25	—
E309LNbT×-×	520	25	—
E309LT×-×	520	25	—
E309MoT×-×	550	25	—
E309LMoT×-×	520	25	—
E309LNiMoT×-×	520	25	—
E310T×-×	550	25	—
E312T×-×	660	22	—
E316T×-×	520	30	—
E316LT×-×	485	30	—
E317LT×-×	520	20	—
E347T×-×	520	25	—
E409T×-×	450	15	—
E410T×-×	520	20	①
E410NiMoT×-×	760	15	②
E410NiTiT×-×	760	15	②
E430T×-×	450	20	③
E502T×-×	415	20	④
E505T×-×	415	20	④
E308HMoT0-3	550	30	—
E316LKT0-3	485	30	—
E2209T0-×	690	20	—
E2553T0-×	760	15	—
E×××T×-G	不规定		
R308LT1-5	520	35	—
R309LT1-5	520	30	—
R316LT1-5	485	30	—
R347T1-5	520	30	—

①加热到 730～760℃保温 1h 后，以不超过 55℃/h 的速度随炉冷至 315℃，出炉空冷至室温。
②加热到 595～620℃保温 1h 后，出炉空冷至室温。
③加热到 760～790℃保温 4h 后，以不超过 55℃/h 的速度随炉冷至 590℃，出炉空冷至室温。

④加热到 840～870℃保温 2h 后，以不超过 55℃/h 的速度随炉冷至 590℃，出炉空冷至室温。

表 2-30　不锈钢药芯焊丝的选用[12]

序号	焊丝型号	用　途
1	E307T×-×	通常用于异种钢的焊接，如奥氏体锰钢与碳钢锻件或铸件的焊接。焊缝强度中等，具有良好的抗裂性
2	E308T×-×	通常用于焊接相同类型的不锈钢，如 12Cr18Ni9（1Cr18Ni9）、06Cr19Ni10（0Cr18Ni9）、10Cr18Ni12(1Cr18Ni12)
3	E308LT×-×	除碳含量较低外，与 E308T×-×的熔敷金属合金元素含量相同。由于碳含量低，在不含铌、钛等稳定剂时，也能抵抗因碳化物析出而产生的晶间腐蚀。但与铌稳定化的焊缝相比，其高温强度较低
4	E308HT×-×	除碳含量限制在上限外，与 E308T×-×的熔敷金属合金元素含量相同。由于碳含量高，在高温下具有较高的抗拉强度和屈服强度
5	E308MoT×-×	除钼含量较高外，与 E308T×-×的熔敷金属合金元素含量相同。通常用于焊接相同类型的不锈钢。也可用于焊接像 06Cr17Ni12Mo2(0Cr17Ni12Mo2)型不锈钢锻件，比采用 E316LT×-×焊丝焊接得到的铁素体含量要高一些
6	E308HMoT0-3	除碳含量限制在上限外，与 E308MoT×-3 的熔敷金属合金元素含量相同。由于碳含量高，其高温强度较高
7	E308LMoT×-×	除碳含量较低外，与 E308MoT×-×的熔敷金属合金元素含量相同。通常用于焊接相同类型的不锈钢。也可用于焊接像 00Cr17Ni14Mo2 型不锈钢铸件，比采用 E316LT×-×焊丝焊接得到的铁素体含量要高一些
8	E309T×-×	通常用于焊接相同类型的不锈钢，有时用于焊接在强腐蚀介质中使用的、要求焊缝合金元素含量较高的不锈钢。也可用于异种钢的焊接，如 06Cr19Ni10（0Cr18Ni9）型不锈钢与碳钢的焊接
9	E309LT×-×	除碳含量较低外，与 E309T×-×的熔敷金属合金元素含量相同。由于碳含量低，在不含铌、钛等稳定剂时，也能抵抗因碳化物析出而产生的晶间腐蚀。但与铌稳定化的焊缝相比，其高温强度较低
10	E309MoT×-×	除钼含量较高外，与 E309T×-×的熔敷金属合金元素含量相同。通常用于堆焊工作温度在 320℃以下的碳钢和低合金钢
11	E309LMoT×-×	除碳含量较低外，与 E309MoT ×-×的熔敷金属合金元素含量相同。通常用于堆焊工作温度在 320℃以下的碳钢和低合金钢
12	E309LNiMoT×-×	除铬含量较低、镍含量较高外，与 E309LMoT×-×的熔敷金属合金元素含量相同。与 E309LMoT×-×相比，其熔敷金属铁素体含量较低，氮化铬析出的可能性减小，因而耐蚀性良好
13	E309LNbT×-×	除加入铌外，与 E309LT×-×的熔敷金属合金元素含量相同。通常用于堆焊碳钢和低合金钢
14	E310T×-×	通常用于焊接相同类型的不锈钢
15	E312T×-×	通常用于高镍合金与其他金属的焊接。焊缝金属为奥氏体基与分布其上的大量铁素体构成的双相组织。因此具有较高的抗裂性
16	E316T×-×	通常用于焊接相同类型的不锈钢。由于钼提高了焊缝的抗高温蠕变能力，也可用于焊接在高温下使用的不锈钢

续表

序号	焊丝型号	用　途
17	E316LT×-×	除碳含量较低外，与E316T×-×的熔敷金属合金元素含量相同。由于碳含量低，在不含铌、钛等稳定剂时，也能抵抗因碳化物析出而产生的晶间腐蚀。但与铌稳定化的焊缝相比，其高温强度较低
18	E316LKT0-3	与E316LT×-×的熔敷金属合金元素含量相同，为自保护型焊丝，主要用于低温工作的不锈钢的焊接。该焊丝降低了碳和氮的含量，焊缝金属具有良好的低温韧性
19	E317LT×-×	通常用于焊接相同类型的不锈钢，可在强腐蚀条件下使用。由于碳含量低，在不含铌、钛等稳定剂时，也能抵抗因碳化物析出而产生的晶间腐蚀。但与铌稳定化的焊缝相比，其高温强度较低
20	E347T×-×	用铌或铌加钽作稳定剂，提高抗晶间腐蚀的能力。通常用于焊接以铌或钛作稳定剂、成分相近的铬镍合金钢
21	E409T×-×	用钛作稳定剂。通常用于焊接相同类型的不锈钢
22	E410T×-×	焊接接头属于空气淬硬型材料，因此焊接时需要进行预热和后热处理，以获得良好的塑性。通常用于焊接相同类型的不锈钢，也用于在碳钢上堆焊，以提高抗腐蚀、耐磨损性能
23	E410NiMoT×-×	通常用于焊接相同类型的不锈钢。与E410T×-×相比，熔敷金属中铬含量低、镍含量高，限制了焊缝组织中的铁素体含量，减少对力学性能的有害影响。焊后热处理温度不应超过620℃，以防止焊缝组织中未回火马氏体重新淬硬
24	E410NiTiT×-×	用钛作稳定剂。通常用于焊接相同类型的不锈钢
25	E430T×-×	熔敷金属中铬含量较高，在通常使用条件下，具有优良的耐腐蚀性能，而在热处理后又可获得足够的塑性。焊接时，通常需要进行预热和后热处理。焊接接头经过热处理后，才能获得理想的力学性能和抗腐蚀能力
26	E520T×-×	通常用于焊接相同类型的不锈钢管材。焊接接头属于空冷淬硬型材料。焊接时，通常需要进行预热和后热处理
27	E505T×-×	通常用于焊接相同类型的不锈钢管材。焊接接头属于空冷淬硬型材料。焊接时，通常需要进行预热和后热处理
28	E2209T×-×	通常用于焊接铬含量约为22%的双相不锈钢。熔敷金属的显微组织为奥氏体-铁素体基体的双相结构，焊缝金属强度较高，同时又具有良好的抗点蚀性能和抗应力腐蚀开裂性能
29	E2553T×-×	通常用于焊接铬含量约为25%的双相不锈钢。熔敷金属的显微组织为奥氏体-铁素体基体的双相结构，焊缝金属强度较高，同时又具有良好的抗点蚀性能和抗应力腐蚀开裂性能
30	R308LT1-5	通常用于06Cr19Ni10(0Cr18Ni9)或00Cr19Ni11型不锈钢管接头根部焊道的焊接，可不用惰性气体背部保护。仅能用于钨极惰性气体保护焊方法，每道焊前必须清渣。使用时应遵循制造厂家的产品说明
31	R309LT1-5	通常用于碳钢管对奥氏体不锈钢管接头根部焊道的焊接，可不用惰性气体背部保护。仅能用于钨极惰性气体保护焊方法，每道焊前必须清渣。使用时应遵循制造厂家的产品说明

续表

序号	焊丝型号	用　途
32	R316LT1-5	通常用于 06Cr17Ni12Mo2(0Cr17Ni12Mo2)或 00Cr17Ni14Mo2 型不锈钢管接头根部焊道的焊接，可不用惰性气体背部保护。仅能用于钨极惰性气体保护焊方法，每道焊前必须清渣。使用时应遵循制造厂家的产品说明
33	R347T1-5	用铌和钽作稳定剂。通常用于 0Cr18Ni11Nb 型不锈钢管接头根部焊道的焊接，可不用惰性气体背部保护。仅能用于钨极惰性气体保护焊方法，每道焊前必须清渣。使用时应遵循制造厂家的产品说明

表 2-31　不锈钢药芯焊丝的选用（碳钢、低合金钢与不锈钢焊接）[13]

母材组合	药芯焊丝	
	型号	牌号
低碳钢＋奥氏体耐酸钢	E309T-× E316T-× E309LT-×	YA309-1 YA316-1 YA309L-1
低碳钢＋奥氏体耐热钢	E316T-× ENiCrT-×	YA316-1
中碳钢、低合金钢＋奥氏体不锈钢	E310T-× E316T-× E317LT-× ENiCr3T-×	YA316-1
碳钢、低合金钢＋普通双相不锈钢	E2209T-×	DW-329M①
低碳钢＋Cr13%不锈钢 低合金钢＋Cr13%不锈钢	E410T-× E309T-×	YG410-1 YA308-1 YA309-1
低碳钢＋Cr17%不锈钢 低合金钢＋Cr17%不锈钢	E430T-× E309T-×	YG430Mo-1 YA309-1

① 为日本“神钢公司”的产品。

表 2-32　不锈钢药芯焊丝的选用（异种不锈钢焊接）[13]

Cr13%不锈钢＋奥氏体耐蚀钢	E309T-× E309LT-×	YA309-1 YA309L-1
Cr13%不锈钢＋奥氏体耐热钢	E316T-× E317T-× E347T-×	YA316-1 YA317-1 YA347-1
Cr13%不锈钢＋普通双相不锈钢	— E309MoT-×	DW-329M① —
Cr17%不锈钢＋奥氏体耐蚀钢	E309T-× E309MoT-×	YA309-1
Cr17%不锈钢＋奥氏体耐热钢	E308T-× E316T-× E317T-× E309MoT-× E347MoT-×	YA308-1 YA316-1 — — YA347-1
Cr17%不锈钢＋普通双相不锈钢	— E309MoT-×	DW-329M① —
Cr11%不锈钢＋奥氏体耐热钢	E316T-× E309T-× E309MoT-× E347T-×	YA316-1 YA309-1 — YA347-1

①为日本“神钢公司”的产品。

表 2-33 不锈钢药芯焊丝、药芯氩弧焊丝牌号型号对照

牌号	符合(相当)GB/T 17853—1999 的型号	牌号	符合(相当)GB/T 17853—1999 的型号
Y307	E307T1-1	Y316M-P	E316T0-4
Y307(M)-P	E307T0-1/4	Y316L	E316LT1-1
Y308	E308T1-1	Y316LM	E316LT1-4
Y308(M)-P	E308T0-1/4	Y316L-P	E316LT0-1
Y308L	E308LT1-1	Y316LM-P	E316LT0-4
Y308LM	E308LT1-4	Y317L	E317LT1-1
Y308L(M)-P	E308LT0-1/4	Y317L(M)-P	E317LT0-1/4
Y308H	E308HT1-1	Y347	E347T1-1
Y308H(M)-P	E308HT0-1/4	Y347-P	E347T0-1
Y308LMo-P	E308LMoT0-1	Y347M	E347T1-4
Y309	E309T1-1	Y347M-P	E347T0-4
Y309Mo-P	E309T0-1/4	Y409	E409T1-1
Y309LM	E309LT1-4	Y410	E410T1-1
Y309L-P	E309LT0-1	Y410NiMo	E410 NiMoT1-1
Y309LM-P	E309LT0-4	Y410NiMo-P	E410 NiMoT0-1
Y309LMo	E309LMoT1-1	Y430	E430T0-1
Y309LMo(M)-P	E309LMoT0-1/4	Y2209-P	E2209T0-1
Y310	E310T1-1	YTG308LA	R308LT1-5
Y316	E316T1-1	YTG309LA	R309LT1-5
Y316-P	E316T0-1	YTG316LA	R316LT1-5

(6) 耐腐蚀、耐热性能

不锈钢药芯焊丝焊接时，由于焊缝金属主要合金成分与母材一致或相近，因此，焊缝的耐蚀、耐热等特性基本上可以保证。

在不锈钢焊接中，降低焊缝金属含碳量是提高其抗晶间腐蚀能力的有效途径之一。然而，当采用含 CO_2 成分的保护气体进行焊接时，焊缝金属的增碳倾向几乎是不可避免的，所以实心不锈钢焊丝通常必须采用不含 CO_2 气体的 MIG 焊。但是，对于不锈钢药芯焊丝来说，即使采用纯 CO_2 作保护气体，焊缝金属碳含量的增加也可控制在很低的水平。近年来，许多超低碳（C≤0.04%或≤0.03%）和极低碳（C≤0.02%）不锈钢药芯焊丝已得到广泛的应用。

2.2.3 不锈钢焊带

(1) 按国家标准制造验收的焊带[14]

我国的不锈钢焊带标准 GB/T 29713—2013《不锈钢焊丝和焊带》（以下简称“GB/T 29713—2013”），是依据 ISO 14343:2009《焊接材料——不锈钢和耐热钢电弧焊用焊丝、填充丝及焊带——分类》标准，结合我国的国情制订而成的，根据我国实际应用情况，增加了 209、218、219、240、307Si、446LMo、2553、3556 八个化学成分分类。该标准包含焊丝和焊带，适用于熔化极气体保护电弧焊、非熔化极气体保护电弧焊、埋弧焊、电渣焊、等离子弧焊及激光焊等用不锈钢焊丝、填充丝及焊带。

① 焊带型号（或焊丝型号）。焊带型号由两部分组成。

a. 第一部分的首位字母“B”表示焊带（“S”表示焊丝）。

b. 第二部分为字母“B”（或“S”）后面的数字或数字与字母的组合表示化学成分分类，其中“L”表示碳含量较低，“H”表示碳含量较高，如有其他特殊要求的化学成分，该化学成分用元素符号表示，放在后面，见表 2-34。

表 2-34　不锈钢焊丝、焊带的化学成分[14]

化学成分分类	化学成分(质量分数)/%										
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Nb①	其他
209	0.05	0.90	4.0～7.0	0.03	0.03	20.5～24.0	9.5～12.0	1.5～3.0	0.75	—	N:0.10～0.30 V:0.10～0.30
218	0.10	3.5～4.5	7.0～9.0	0.03	0.03	16.0～18.0	8.0～9.0	0.75	0.75	—	N:0.08～0.18
219	0.05	1.00	8.0～10.0	0.03	0.03	19.0～21.5	5.5～7.0	0.75	0.75	—	N:0.10～0.30
240	0.05	1.00	10.5～13.5	0.03	0.03	17.0～19.0	4.0～6.0	0.75	0.75	—	N:0.10～0.30
307②	0.04～0.14	0.65	3.3～4.8	0.03	0.03	19.5～22.0	8.0～10.7	0.5～1.5	0.75	—	—
307Si②	0.04～0.14	0.65～1.00	6.5～8.0	0.03	0.03	18.5～22.0	8.0～10.7	0.75	0.75	—	—
307Mn②	0.20	1.2	5.0～8.0	0.03	0.03	17.0～20.0	1.0～10.0	0.5	0.5	—	—
308	0.08	0.65	1.0～2.5	0.03	0.03	19.5～22.0	9.0～11.0	0.75	0.75	—	—
308Si	0.08	0.65～1.00	1.0～2.5	0.03	0.03	19.5～22.0	9.0～11.0	0.75	0.75	—	—
308H	0.04～0.08	0.65	1.0～2.5	0.03	0.03	19.5～22.0	9.0～11.0	0.50	0.75	—	—
308L	0.03	0.65	1.0～2.5	0.03	0.03	19.5～22.0	9.0～11.0	0.75	0.75	—	—
308LSi	0.03	0.65～1.00	1.0～2.5	0.03	0.03	19.5～22.0	9.0～11.0	0.75	0.75	—	—

续表

化学成分分类	化学成分(质量分数)/%										
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Nb[①]	其他
308Mo	0.08	0.65	1.0～2.5	0.03	0.03	18.0～21.0	9.0～12.0	2.0～3.0	0.75	—	—
308LMo	0.03	0.65	1.0～2.5	0.03	0.03	18.0～21.0	9.0～12.0	2.0～3.0	0.75	—	—
309	0.12	0.65	1.0～2.5	0.03	0.03	23.0～25.0	12.0～14.0	0.75	0.75	—	—
309Si	0.12	0.65～1.00	1.0～2.5	0.03	0.03	23.0～25.0	12.0～14.0	0.75	0.75	—	—
309L	0.03	0.65	1.0～2.5	0.03	0.03	23.0～25.0	12.0～14.0	0.75	0.75	—	—
309LD[③]	0.03	0.65	1.0～2.5	0.03	0.03	21.0～24.0	10.0～12.0	0.75	0.75	—	—
309LSi	0.03	0.65～1.00	1.0～2.5	0.03	0.03	23.0～25.0	12.0～14.0	0.75	0.75	—	—
309LNb	0.03	0.65	1.0～2.5	0.03	0.03	23.0～25.0	12.0～14.0	0.75	0.75	10C～1.0	—
309LNbD[③]	0.03	0.65	1.0～2.5	0.03	0.03	20.0～23.0	11.0～13.0	0.75	0.75	10C～1.2	—
309Mo	0.12	0.65	1.0～2.5	0.03	0.03	23.0～25.0	12.0～14.0	2.0～3.0	0.75	—	—
309LMo	0.03	0.65	1.0～2.5	0.03	0.03	23.0～25.0	12.0～14.0	2.0～3.0	0.75	—	—
309LMoD[③]	0.03	0.65	1.0～2.5	0.03	0.03	19.0～22.0	12.0～14.0	2.3～3.3	0.75	—	—

续表

化学成分分类	化学成分(质量分数)/%										
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Nb[1]	其他
310[2]	0.08～0.15	0.65	1.0～2.5	0.03	0.03	25.0～28.0	20.0～22.5	0.75	0.75	—	—
310S[2]	0.08	0.65	1.0～2.5	0.03	0.03	25.0～28.0	20.0～22.5	0.75	0.75	—	—
310L[2]	0.03	0.65	1.0～2.5	0.03	0.03	25.0～28.0	20.0～22.5	0.75	0.75	—	—
312	0.15	0.65	1.0～2.5	0.03	0.03	28.0～32.0	8.0～10.5	0.75	0.75	—	—
316	0.08	0.65	1.0～2.5	0.03	0.03	18.0～20.0	11.0～14.0	2.0～3.0	0.75	—	—
316Si	0.08	0.65～1.00	1.0～2.5	0.03	0.03	18.0～20.0	11.0～14.0	2.0～3.0	0.75	—	—
316H	0.04～0.08	0.65	1.0～2.5	0.03	0.03	18.0～20.0	11.0～14.0	2.0～3.0	0.75	—	—
316L	0.03	0.65	1.0～2.5	0.03	0.03	18.0～20.0	11.0～14.0	2.0～3.0	0.75	—	—
316LSi	0.03	0.65～1.00	1.0～2.5	0.03	0.03	18.0～20.0	11.0～14.0	2.0～3.0	0.75	—	—
316LCu	0.03	0.65	1.0～2.5	0.03	0.03	18.0～20.0	11.0～14.0	2.0～3.0	1.0～2.5	—	—
316LMn[2]	0.03	1.0	5.0～9.0	0.03	0.02	19.0～22.0	15.0～18.0	2.5～4.5	0.5	—	N:0.10～0.20
317	0.08	0.65	1.0～2.5	0.03	0.03	18.5～20.5	13.0～15.0	3.0～4.0	0.75	—	—

续表

化学成分分类	化学成分(质量分数)/%										
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Nb[①]	其他
317L	0.03	0.65	1.0～2.5	0.03	0.03	18.5～20.5	13.0～15.0	3.0～4.0	0.75	—	—
318	0.08	0.65	1.0～2.5	0.03	0.03	18.0～20.0	11.0～14.0	2.0～3.0	0.75	8C～1.0	—
318L	0.03	0.65	1.0～2.5	0.03	0.03	18.0～20.0	11.0～14.0	2.0～3.0	0.75	8C～1.0	—
320[②]	0.07	0.60	2.5	0.03	0.03	19.0～21.0	32.0～36.0	2.0～3.0	3.0～4.0	8C～1.0	—
320LR[②]	0.025	0.15	1.5～2.0	0.015	0.02	19.0～21.0	32.0 36.0	2.0～3.0	3.0～4.0	8C～0.40	—
321	0.08	0.65	1.0～2.5	0.03	0.03	18.5～20.5	9.0～10.5	0.75	0.75	—	Ti:9C～1.0
330	0.18～0.25	0.65	1.0～2.5	0.03	0.03	15.0～17.0	34.0～37.0	0.75	0.75	—	—
347	0.08	0.65	1.0～2.5	0.03	0.03	19.0～21.5	9.0～11.0	0.75	0.75	10C～1.0	—
347Si	0.08	0.65～1.00	1.0～2.5	0.03	0.03	19.0～21.5	9.0～11.0	0.75	0.75	10C～1.0	—
347L	0.03	0.65	1.0～2.5	0.03	0.03	19.0～21.5	9.0～11.0	0.75	0.75	10C～1.0	—
383[②]	0.025	0.50	1.0～2.5	0.02	0.03	26.5～28.5	30.0～33.0	3.2～4.2	0.7～1.5	—	—
385[②]	0.025	0.50	1.0～2.5	0.02	0.03	19.5～21.5	24.0～26.0	4.2～5.2	1.2～2.0	—	—

续表

化学成分分类	化学成分(质量分数)/%										
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Nb[①]	其他
409	0.08	0.8	0.8	0.03	0.03	10.5～13.5	0.6	0.50	0.75	—	Ti:10C～1.5
409Nb	0.12	0.5	0.6	0.03	0.03	10.5～13.5	0.6	0.75	0.75	8C～1.0	—
410	0.12	0.5	0.6	0.03	0.03	11.5～13.5	0.6	0.75	0.75	—	—
410NiMo	0.06	0.5	0.6	0.03	0.03	11.0～12.5	4.0～5.0	0.4～0.7	0.75	—	—
420	0.25～0.40	0.5	0.6	0.03	0.03	12.0～14.0	0.75	0.75	0.75	—	—
430	0.10	0.5	0.6	0.03	0.03	15.5～17.0	0.6	0.75	0.75	—	—
430Nb	0.10	0.5	0.6	0.03	0.03	15.5～17.0	0.6	0.75	0.75	8C～1.2	—
430LNb	0.03	0.5	0.6	0.03	0.03	15.5～17.0	0.6	0.75	0.75	8C～1.2	—
439	0.04	0.8	0.8	0.03	0.03	17.0～19.0	0.6	0.5	0.75	—	Ti:10C～1.1
446LMo	0.015	0.4	0.4	0.02	0.02	25.0～27.5	Ni+Cu:0.5	0.75～1.50	Ni+Cu:0.5	—	N:0.015
630	0.05	0.75	0.25～0.75	0.03	0.03	16.00～16.75	4.5～5.0	0.75	3.25～4.00	0.15～0.30	—

续表

化学成分分类	化学成分(质量分数)/%										
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Nb[①]	其他
16-8-2	0.10	0.65	1.0～2.5	0.03	0.03	14.5～16.5	7.5～9.5	1.0～2.0	0.75	—	—
19-10H	0.04～0.08	0.65	1.0～2.0	0.03	0.03	18.5～20.0	9.0～11.0	0.25	0.75	0.05	Ti:0.05
2209	0.03	0.90	0.5～2.0	0.03	0.03	21.5～23.5	7.5～9.5	2.5～3.5	0.75	—	N:0.08～0.20
2553	0.04	1.0	1.5	0.04	0.03	24.0～27.0	4.5～6.5	2.9～3.9	1.5～2.5	—	N:0.10～0.25
2594	0.03	1.0	2.5	0.03	0.02	24.0～27.0	8.0～10.5	2.5～4.5	1.5	—	N:0.20～0.30 W:1.0
33-31	0.015	0.50	2.00	0.02	0.01	31.0～35.0	30.0～33.0	0.5～2.0	0.3～1.2	—	N:0.35～0.60
3556	0.05～0.15	0.20～0.80	0.50～2.00	0.04	0.015	21.0～23.0	19.0～22.5	2.5～4.0	—	0.30	④
Z[⑤]	其他成分										

① 不超过 Nb 含量总量的 20%，可用 Ta 代替。

② 熔敷金属在多数情况下是纯奥氏体，因此对微裂纹和热裂纹敏感。增加焊缝金属中的 Mn 含量可减少裂纹的产生，经供需双方协商，Mn 的范围可以扩大到一定等级。

③ 这些分类主要用于低稀释率的堆焊，如电渣焊带。

④ N：0.10～0.30；Co：16.0～21.0；W：2.0～3.5；Ta：0.30～1.25；Al：0.10～0.50；Zr：0.001～0.100；La：0.005～0.100；B：0.02。

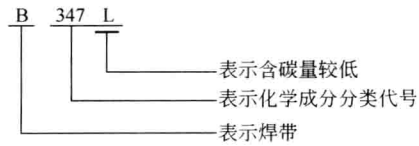
⑤ 表中未列的焊丝及焊带可用相类似的符号表示，词头加字母“Z”。化学成分范围不进行规定，两种分类之间不可替换。

注：表中单值均为最大值。

焊丝型号示例如下[14]：



焊带的型号示例如下：



GB/T 29713—2013 规定许多焊丝或焊带型号的化学元素含量与 YB/T 5092—2005《焊接用不锈钢焊丝》中的焊丝牌号的化学元素含量基本一致。它们之间的对应关系见表 2-21。

② 焊丝及焊带熔敷金属力学性能。焊丝及焊带的熔敷金属力学性能参考值见表 2-35。

表 2-35　不锈钢焊丝及焊带的熔敷金属力学性能参考值[14]

化学成分分类	抗拉强度 R_m/MPa	断后伸长率 A/%	焊后热处理
307	590	25	—
307Mn	500	25	—
308	550	25	—
308Si	550	25	—
308H	550	30	—
308L	510	25	—
308LSi	510	25	—
308Mo	620	20	—
308LMo	510	30	—
309	550	25	—
309Si	550	25	—
309L	510	25	—
309LD	510	20	
309LSi	510	25	—
309LNb	550	25	—
309LNbD	510	20	—
309Mo	510	25	—
309LMo	550	25	—
309LMoD	510	20	—
310	550	20	—
310S	550	20	—
310L	510	20	—
312	650	15	—

续表

化学成分分类	抗拉强度 R_m/MPa	断后伸长率 A/%	焊后热处理
316	510	25	—
316Si	510	25	—
316H	550	25	—
316L	510	25	—
316LSi	510	25	—
316LCu	510	25	—
316LMn	510	25	—
317	550	25	
317L	480	25	—
318	550	25	—
318L	510	25	—
320	550	25	—
320LR	520	25	—
321	550	25	—
330	550	10	—
347	550	25	—
347Si	550	25	—
347L	510	25	—
383	500	25	—
385	510	25	—
409	380	15	—
409Nb	450	15	①
410[a]	450	15	②或①
410NiMo	750	15	③
420	450	15	②
430	450	15	④
430Nb	450	15	④
430LNb	410	15	—
439	410	15	—
630	930	5	⑤
16-8-2	510	25	—
19-10H	550	30	—
2209	550	20	—
2594	620	18	—
33-31	720	25	—

a 此类焊丝、填充丝及焊带的熔敷金属中的碳较高，适于在高温下服役。室温下断后伸长率相对于使用温度时有些低，熔敷金属的断后伸长率低于母材。

注：①加热到 730～760℃，保温 1h，炉冷至 600℃，然后空冷。

②加热到 840～870℃，保温 2h，炉冷至 600℃，然后空冷。

③加热到 580～620℃，保温 2h，空冷。

④加热到 760～790℃，保温 2h，炉冷至 600℃，然后空冷。

⑤加热到 1025～1050℃，保温 1h，空冷至室温，然后加热到 610～630℃，保温 4h，空冷。

表中单值均为最小值。

（2）承压设备用不锈钢焊带

承压设备用不锈钢焊带执行 NB/T 470118.5—2011《承压设备用焊接材料订货技术条件　第 5 部分：堆焊用不锈钢焊带和焊剂》（以下简称“NB/T 47018.5—2011”）规定了不锈钢焊带、焊剂的分类及技术要求。该标准适用于承压设备埋弧焊或电渣耐蚀堆焊。不锈钢焊带的型号及化学成分见表 2-36。

焊带的型号示例如下：

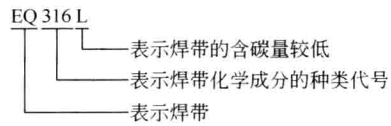


表 2-36　承压设备用不锈钢焊带的型号及化学成分（质量分数）[15]　　%

焊带型号	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Nb
EQ308	0.060	1.00	0.5～2.5	0.025	0.015	9.0～12.0	18.0～21.0	0.50	0.75	—
EQ308L	0.030	1.00	0.5～2.5	0.025	0.015	9.0～12.0	18.0～21.0	0.50	0.75	—
EQ309(A)	0.060	1.00	0.5～2.5	0.025	0.015	9.0～12.0	21.0～23.0	0.50	0.75	—
EQ309(B)	0.060	1.00	0.5～2.5	0.025	0.015	12.0～14.0	23.0～25.0	0.50	0.75	—
EQ309L(A)	0.030	1.00	0.5～2.5	0.025	0.015	9.0～12.0	21.0～23.0	0.50	0.75	—
EQ309L(B)	0.030	1.00	0.5～2.5	0.025	0.015	12.0～14.0	23.0～25.0	0.50	0.75	—
EQ309LMo	0.030	1.00	0.5～2.5	0.025	0.015	11.0～15.0	21.0～25.0	2.0～3.5	0.75	—
EQ316	0.060	1.00	0.5～2.5	0.025	0.015	11.0～15.0	17.5～22.5	2.0～3.5	0.75	—
EQ316L	0.030	1.00	0.5～2.5	0.025	0.015	11.0～15.0	17.5～22.5	2.0～3.5	0.75	—
EQ347	0.060	1.00	0.5～2.5	0.025	0.015	9.0～12.0	18.0～21.0	—	0.75	8C～1.0
EQ347L	0.030	1.00	0.5～2.5	0.025	0.015	9.0～12.0	18.0～21.0	—	0.75	8C～1.0
EQ309LNb	0.030	1.00	0.5～2.5	0.025	0.015	9.0～14.0	21.0～25.0	—	0.75	8C～1.0
EQ385	0.025	0.50	1.0～2.5	0.025	0.015	24.0～26.0	19.5～21.5	4.2～5.2	1.2～2.0	—

注：表中单值均为最大值。

（3）不锈钢焊带牌号与型号对应关系

不锈钢焊带牌号与型号对应关系见表 2-37。

表 2-37 不锈钢焊带牌号与型号对应关系[4]

类别	牌号	符合标准的型号	
		NB/T 47018.5—2011	GB/T 3280
奥氏体钢	HD308	EQ308	
	HD308L	EQ308L	
	HD309A	EQ309(A)	
	HD309B	EQ309(B)	
	HD309LA	EQ309L(A)	
奥氏体钢	HD309LB	EQ309L(B)	
	HD309LNb	EQ309LNb	
	HD309LMo	EQ309LMo	
	HD316	EQ316	
	HD316L	EQ316L	
	HD317L	—	
	HD347	EQ347	
	HD347L	EQ347L	
	HD385	EQ385	
双相不锈钢	HD2205	—	
	HD2209	—	
马氏体钢	HD1Cr13	—	12Cr13
	HD0Cr13Ni5Mo	—	04Cr13Ni5Mo
	HD2Cr13	—	20Cr13
	HD1Cr17	—	10Cr17

注：1. HD308、HD308L、HD309A、HD309B、HD309LA、HD309LB、HD309LNb、HD309LMo、HD316、HD316L、HD347、HD347L 等焊带生产单位如下：天津金桥焊材集团有限公司、机械科学研究院哈尔滨焊接研究所、安泰科技股份有限公司、哈尔滨威尔焊接有限公司。HD317L、HD385、HD2209、HD2205、HD1Cr13、HD0Cr13Ni5Mo、HD2Cr13、HD1Cr17 等焊带生产单位如下：机械科学研究院哈尔滨焊接研究所、安泰科技股份有限公司、哈尔滨威尔焊接有限公司。

2. HD2205 的化学成分（%），C≤0.030；Mn：0.5～2.0；Si≤0.90；Cr：21.5～23.5；Ni：4.5～7.0；Mo：2.5～3.5；P≤0.030；S≤0.030；N：0.08～0.20。

3. HD2209 的化学成分（%），C≤0.030；Mn：0.5～2.0；Si≤0.90；Cr：21.5～23.5；Ni：7.5～9.5；Mo：2.5～3.5；P≤0.030；S≤0.030；N：0.08～0.20。

（4）不同标准的不锈钢焊带对应关系

NB/T 47018.5—2011 标准对 S、P 含量的限制严于 GB/T 29713—2013 标准。NB/T 47018.5—2011 标准焊带 Mo 含量上限普遍低于 GB/T 29713—2013 标准要求。NB/T 47018.5—2011 标准规定的焊带与 GB/T 29713—2013 标准规定的焊带之间的关系见表 2-38。通过表 2-38 的数据可得知两标准的焊带化学成分比较接近（邻近的焊带牌号），但

没有完全符合的焊带。

表 2-38　不同标准的不锈钢焊带的关系[14,15]

标准	型号	化学成分(质量分数)/%									
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Nb
NB/T	EQ308	0.060	1.00	0.5～2.5	0.025	0.015	18.0～21.0	9.0～12.0	0.50	0.75	—
GB/T	B308	0.08	0.65	1.0～2.5	0.03	0.03	19.5～22.0	9.0～11.0	0.75	0.75	—
NB/T	EQ308L	0.030	1.00	0.5～2.5	0.025	0.015	18.0～21.0	9.0～12.0	0.50	0.75	—
GB/T	B308L	0.03	0.65	1.0～2.5	0.03	0.03	19.5～22.0	9.0～11.0	0.75	0.75	—
NB/T	EQ309(A)	0.060	1.00	0.5～2.5	0.025	0.015	21.0～23.0	9.0～12.0	0.50	0.75	—
NB/T	EQ309(B)	0.060	1.00	0.5～2.5	0.025	0.015	23.0～25.0	12.0～14.0	0.50	0.75	—
GB/T	B309	0.12	0.65	1.0～2.5	0.03	0.03	23.0～25.0	12.0～14.0	0.75	0.75	—
NB/T	EQ309L(A)	0.030	1.00	0.5～2.5	0.025	0.015	21.0～23.0	9.0～12.0	0.50	0.75	—
NB/T	EQ309L(B)	0.030	1.00	0.5～2.5	0.025	0.015	23.0～25.0	12.0～14.0	0.50	0.75	—
GB/T	B309L	0.03	0.65	1.0～2.5	0.03	0.03	23.0～25.0	12.0～14.0	0.75	0.75	—
NB/T	EQ309LMo	0.030	1.00	0.5～2.5	0.025	0.015	21.0～25.0	11.0～15.0	2.0～3.5	0.75	—
GB/T	B309LMo	0.03	0.65	1.0～2.5	0.03	0.03	23.0～25.0	12.0～14.0	2.0～3.0	0.75	—
NB/T	EQ316	0.060	1.00	0.5～2.5	0.025	0.015	17.5～22.5	11.0～15.0	2.0～3.5	0.75	—
GB/T	B316	0.08	0.65	1.0～2.5	0.03	0.03	18.0～20.0	11.0～14.0	2.0～3.0	0.75	—
NB/T	EQ316L	0.030	1.00	0.5～2.5	0.025	0.015	17.5～22.5	11.0～15.0	2.0～3.5	0.75	—
GB/T	B316L	0.03	0.65	1.0～2.5	0.03	0.03	18.0～20.0	11.0～14.0	2.0～3.0	0.75	—
NB/T	EQ347	0.060	1.00	0.5～2.5	0.025	0.015	18.0～21.0	9.0～12.0	—	0.75	8C～1.0
GB/T	B347	0.08	0.65	1.0～2.5	0.03	0.03	19.0～21.5	9.0～11.0	0.75	0.75	10C～1.0

续表

标准	型号	化学成分(质量分数)/%									
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Nb
NB/T	EQ347L	0.030	1.00	0.5～2.5	0.025	0.015	18.0～21.0	9.0～12.0	—	0.75	8C～1.0
GB/T	B347L	0.03	0.65	1.0～2.5	0.03	0.03	19.0～21.5	9.0～11.0	0.75	0.75	10C～1.0
NB/T	EQ309LNb	0.030	1.00	0.5～2.5	0.025	0.015	21.0～25.0	9.0～14.0	—	0.75	8C～1.0
GB/T	B309LNb	0.03	0.65	1.0～2.5	0.03	0.03	23.0～25.0	12.0～14.0	0.75	0.75	10C～1.0
NB/T	EQ385	0.025	0.50	1.0～2.5	0.025	0.015	19.5～21.5	24.0～26.0	4.2～5.2	1.2～2.0	—
GB/T	B385①	0.025	0.50	1.0～2.5	0.02	0.03	19.5～21.5	24.0～26.0	4.2～5.2	1.2～2.0	—

①熔敷金属在多数情况下是纯奥氏体，因此对微裂纹和热裂纹敏感。增加焊缝金属中的 Mn 含量可减少裂纹的产生，经供需双方协商，Mn 的范围可以扩大到一定等级。

注：1. 表中单值均为最大值。

2. “NB/T”是 NB/T 47018.5—2011《承压设备用焊接材料订货技术条件 第5部分：堆焊用不锈钢焊带和焊剂》的缩写；“GB/T”是 GB/T 29713—2013《不锈钢焊带和焊丝》的缩写。

(5) 不锈钢焊带规格及焊接工艺规范参数

①《焊接材料产品手册》中列出的不锈钢焊带的横截面尺寸有：0.5mm×30mm、0.5mm×60mm、0.4mm×50mm、0.4mm×75mm 等规格。NB/T 47018.5—2011 标准规定的焊带宽度为 30mm、60mm、90mm、120mm，焊带的标准厚度为 0.5mm。也可以经供需双方协商提供其他规格的焊带。焊带的宽度、厚度及其允许偏差按表 2-39 规定。切边焊带的直线度要求见表 2-40。

表 2-39 焊带的宽度、厚度及其允许偏差[15] mm

项目	允许偏差
宽度	±0.20
厚度	±0.05

表 2-40 切边焊带的直线度要求[15] mm

焊带宽度	长度	允许偏差
≤60	1000	±3.0
>60	1000	±2.0

② 不锈钢带极埋弧堆焊焊接工艺规范参数见表 2-41，不锈钢带极电渣堆焊焊接工艺规范参数见表 2-42。

表 2-41　不锈钢带极埋弧堆焊焊接工艺规范参数[4]

焊带横截面尺寸/mm	焊接电流/A	堆焊电压/V	堆焊速度/(mm/min)	带极伸长/mm	焊剂厚度/mm	焊道搭边/mm
0.5×30	350～500	26～30	140～220	30～40	—	4～8
0.5×60	700～1000	28～32	140～220	30～40	—	4～8
0.4×50	500～800	28～32	140～220	30～40	—	4～8
0.4×75	950～1300	28～32	140～220	30～40	—	4～8

表 2-42　不锈钢带极电渣堆焊焊接工艺规范参数[4]

焊带横截面尺寸/mm	焊接电流/A	堆焊电压/V	堆焊速度/(mm/min)	带极伸长/mm	焊剂厚度/mm	焊道搭边/mm
0.5×30	350～500	24～30	140～220	30～40	15～25	5～12
0.5×60	750～1000	24～30	140～220	30～40	15～25	5～12
0.4×50	500～800	24～30	140～220	30～40	15～25	5～12
0.4×75	950～1300	24～30	140～220	30～40	15～25	5～12

2.3 不锈钢埋弧焊用焊剂

2.3.1 焊剂的作用

埋弧焊用焊剂的焊接工艺性能、焊剂的化学冶金性能是决定焊缝金属性能的主要因素之一。除此之外，焊剂还有下列作用。

① 焊接时焊剂覆盖着焊接区，防止空气中氧、氮在施焊时侵入焊接熔池以保护焊缝金属。

② 焊渣壳覆盖在焊缝上，减慢了焊缝金属的冷却速度，改善了气体逸出条件，有助于减少气孔。焊渣容易从焊缝金属表面剥落。

③ 焊接过程中稳定电弧燃烧。要求焊剂的熔点应比被焊钢材的熔化温度低 200～300℃，对于不锈钢埋弧焊用焊剂还要求其焊剂的化学成分不致使焊缝金属增碳，且有可能使合金元素渗入焊缝中去，以求提高焊接接头的耐腐蚀性能。

2.3.2 焊剂的分类

不锈钢埋弧焊用焊剂，通常按其制造方法进行分类。

(1) 熔炼焊剂

熔炼焊剂目前仍是我国不锈钢埋弧焊用的主要焊剂，它是将原料按比例混合后，经高温加热到 1300℃以上，使其熔化炼制均匀后，逐渐倒入冷却水中凝固和实现颗粒化，再经过烘干（有的需进一步粉碎），过筛成所需要规格的颗粒。

我国熔炼焊剂的牌号以“HJ”表示，其后面的第一位数字表示的焊剂类型的含义（如 MnO 含量）见表 2-43。后面的第二位数字表示的焊剂类型的含义（SiO_2 及 CaF_2 的含量）见表 2-44。后面的第三位数字表示相同类型中不同编号，按 0，1，2，…，8，9 顺序排列。

表 2-43 焊剂牌号中 MnO 含量的划分[4]

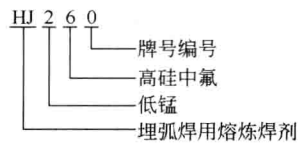
牌号	焊剂类型	MnO(质量分数)/%
HJ1××	无锰	<2
HJ2××	低锰	2～15
HJ3××	中锰	15～30
HJ4××	高锰	>30

表 2-44 焊剂牌号中 SiO_2 和 CaF_2 含量的划分[4]

牌号	焊剂类型	SiO_2(质量分数)/%	CaF_2(质量分数)/%
HJ×0×	中硅中氟	10～30	10～30
HJ×1×	低硅低氟	<10	<10
HJ×2×	中硅低氟	10～30	<10
HJ×3×	高硅低氟	>30	<10
HJ×4×	低硅中氟	<10	10～30
HJ×5×	中硅中氟	10～30	10～30
HJ×6×	高硅中氟	>30	10～30
HJ×7×	低硅高氟	<10	>30
HJ×8×	中硅高氟	10～30	>30
HJ×9×	其他	—	—

不锈钢埋弧焊用熔炼焊剂的牌号和主要化学成分及主要用途见表 2-45。

举例：



不同类型焊剂，其化学活性有差别，对焊缝成分和性能将产生重要影响。使用“772”焊剂、HJ107 焊剂、HJ260 焊剂的电弧稳定，焊缝成形美观，脱渣性也好。“772”焊剂和 HJ107 焊剂脱渣性优于 HJ260 焊剂，使用 HJ260 焊剂焊成的焊缝表面有残留细斜条状沾渣现象。从抗气孔性能方面比较，由于“772”焊剂对水分十分敏感，所以对该焊剂要求严格烘干，不然易生成气孔。HJ107 焊剂和 HJ260 焊剂的抗气孔性较好，其中 HJ107 焊剂优于 HJ260 焊剂。特别是 HJ107 焊剂中含有较多的 CaF_2，又加入了 Na_3AlF_6（冰晶石），从而提高了焊缝金属抗气孔和裂纹的能力[1]。

表 2-45　不锈钢埋弧焊用熔炼焊剂的牌号和主要化学成分及主要用途[4,16]

焊剂牌号	焊剂化学成分（质量分数）/%	熔敷金属化学成分（质量分数）/%	力学性能	烘干温度与时间	主要用途
HJ107	SiO_2：26～30；$Al_2O_3+TiO_2$：24～30；FeO+MnO：10；CaO+MgO：30～40；CaF_2：10～30	①配合 H308 焊丝，C≤0.08；Mn：0.50～2.50；Si≤1.00；S≤0.030；P≤0.040；Cr：18.0～21.0；Ni：9.0～11.0 ②配合 H347 焊丝，C≤0.08；Mn：0.50～2.50；Si≤1.00；S≤0.030；P≤0.040；Cr：18.0～21.0；Ni：9.0～11.0；Nb：8C～1.0	①F308-H0Cr21Ni10：R_m≥520MPa，A≥30% ②F347-H0Cr20Ni10Nb：R_m≥520MPa，A≥25%	300～350℃，烘焙 2h	配合奥氏体不锈钢焊丝或焊带[如 H0Cr21Ni10(H308)、H00Cr21Ni10(H308L)、H0Cr20Ni10Nb(H347)等]进行带极堆焊或焊接，用于核容器及石油化工设备耐腐蚀层堆焊和构件焊接
HJ151	SiO_2：20～30；$Al_2O_3+TiO_2$：20～35；FeO+MnO：≤3；CaO+MgO：15～25；CaF_2：15～25	①配合 H308 焊丝，C≤0.08；Mn：0.50～2.50；Si≤1.00；S≤0.030；P≤0.040；Cr：18.0～21.0；Ni：9.0～11.0 ②配合 H308L 焊丝，C≤0.04；Mn：0.50～2.50；Si≤1.00；S≤0.030；P≤0.040；Cr：18.0～21.0；Ni：9.0～11.0 ③配合 H347 焊丝，C≤0.08；Mn：0.50～2.50；Si≤1.00；S≤0.030；P≤0.040；Cr：18.0～21.0；Ni：9.0～11.0；Nb：8C～1.0	①F308-H0Cr21Ni10：R_m≥520MPa，A≥30% ②F308L-H00Cr21Ni10：R_m≥480MPa，A≥25% ③F347-H0Cr20Ni10Nb：R_m≥520MPa，A≥25%	250～300℃，烘焙 2h	配合奥氏体不锈钢焊丝或焊带[如 H0Cr21Ni10(H308)、H00Cr21Ni10(H308L)、H0Cr20Ni10Nb(H347)等]，进行带极堆焊或焊接，用于核容器及石油化工设备耐腐蚀层堆焊和构件焊接
HJ172	SiO_2：3～10；$Al_2O_3+TiO_2$：28～38；FeO+MnO：≤3；CaO+MgO：2～10；CaF_2：45～55			300～400℃，烘焙 2h	配合适当焊丝，可焊接高铬马式体热强钢如 15Cr12WmoV 及含铌的铬镍不锈钢
HJ260	SiO_2：30～40；$Al_2O_3+TiO_2$：18～30；FeO+MnO：2～10；CaO+MgO：18～30；CaF_2：20～30	①配合 H308 焊丝，C≤0.08；Mn：0.50～2.50；Si≤1.00；S≤0.030；P≤0.040；Cr：18.0～21.0；Ni：9.0～11.0 ②配合 H347 焊丝，C≤0.08；Mn：0.50～2.50；Si≤1.00；S≤0.030；P≤0.040；Cr：18.0～21.0；Ni：9.0～11.0；Nb：8C～1.0	①F308-H0Cr21Ni10：R_m≥520MPa，A≥30% ②F347-H0Cr20Ni10Nb：R_m≥520MPa，A≥25%	300～400℃，烘焙 2h	配合奥氏体不锈钢焊丝[如 H0Cr21Ni10(H308)、H0Cr20Ni10Nb(H347)等]焊接相应耐酸不锈钢结构，也可用于轧辊堆焊
“772”焊剂	Al_2O_3：19～24；CaF_2：45～50；NaF：3～4；ZrO_2：2～4；S、P≤0.05			300～400℃，烘焙 2h	配合相应的焊丝，可用于焊接奥氏体-铁素体不锈钢，也可用于焊接纯奥式体不锈钢

注：“772 焊剂”为宝鸡钢管厂焊剂分厂生产的非标焊剂。

超低碳18-8型不锈钢采用埋弧焊焊接时，最好选用“772”焊剂和HJ107焊剂，除了它们具有良好的焊接工艺性能外，还在于焊缝金属中不增碳或极少增碳，对焊缝金属的耐腐蚀性能极为有利，故焊接一般奥氏体不锈钢时，可以选用HJ107焊剂和HJ260焊剂[1]。

（2）烧结焊剂

制造烧结焊剂所采用的原材料与制造焊条所采用的药皮原材料相接近，对成分和颗粒大小均有严格要求。按照给定的比例配料后先进行干混合，然后加入黏结剂（水玻璃）进行湿混合，混合均匀后送入造粒机加工成颗粒状，然后将颗粒状焊剂进行150～200℃固化、干燥，最后送入烧结炉内烧结。经400～500℃烧结后成为低温烧结焊剂，经700～1000℃烧结者为高温烧结焊剂。

烧结焊剂制造工艺简单，不需要复杂的熔炼设备，与熔炼焊剂相比有下列特点：①该焊剂无需用电弧炉熔炼，避免了石墨混入焊剂中，克服了向焊缝金属中增碳的可能性；②在焊剂中渗入合金元素有利于向焊缝金属过渡，以提高焊缝金属的耐腐蚀性能和低温韧性；③焊接工艺性较好，没有像采用熔炼焊剂施焊时那样在焊缝两边粘渣严重和脱渣性差的现象，焊缝金属合金元素烧损少且可能得到补偿。

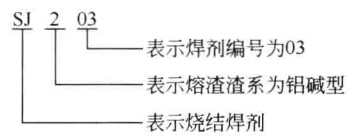
我国烧结焊剂的牌号用字母“SJ”和三位数字表示，“SJ”表示埋弧焊用烧结焊剂；其后第一位数字表示焊剂熔渣渣系，见表2-46；其后第二、第三位数字表示同一渣系类型焊剂的不同牌号，按01，02，…，09顺序编排。

不锈钢埋弧焊用烧结焊剂的牌号和主要化学成分及主要用途见表2-47。

表2-46 焊剂熔渣渣系[4]

牌号	熔渣渣系类型	主要化学成分(质量分数)/%
SJ1××	氟碱型	$CaF_2 \geqslant 15$，$CaO+MgO+MnO+CaF_2 \geqslant 50$，$SiO_2 \leqslant 20$
SJ2××	铝碱型	$Al_2O_3 \geqslant 20$，$CaO+MgO+Al_2O_3 > 45$
SJ3××	硅钙型	$CaO+MgO+SiO_2 > 60$
SJ4××	硅锰型	$MnO+SiO_2 > 50$
SJ5××	铝钛型	$Al_2O_3+TiO_2 > 45$
SJ6××	其他型	不规定

举例



我国不锈钢埋弧焊用烧结焊剂起步不晚，但质量长期不稳定，现在质量已有保证，但产量还不多，使用尚不广泛。随着我国冶金和石化工业的发展，烧结焊剂的研制、发展和使用将有广阔的前景。用SJ601焊剂配合H03Cr21Ni10（H00Cr21Ni10）焊丝来焊接超低碳18-8型奥氏体不锈钢，其焊缝金属在－103℃时低温冲击吸收能量KV_2（A_{kV}）≥47J。甘肃工业大学为满足热壁加氢反应器、尿素设备及煤气交换炉等内壁不锈钢堆焊研制的高碱度烧结焊剂，工艺性能稳定，脱渣性好，可向堆焊层补充多种合金元素。用该焊剂配合H00Cr21Ni10Nb焊丝，堆焊层主要合金元素的质量分数（%）为：C＜0.05，Cr＞18，Ni＞9，Nb＝8C～1.0，其铁素体的体积分数为4%～7%，完全满足了设计技术要求。

（3）黏结焊剂

黏结焊剂又称陶质焊剂，制作时把粉末原料进行混合后加入水玻璃，湿混均匀后造粒，在较低温度（300～400℃）下干燥制成，也可以先烘干再造粒。这种焊剂与上述焊剂相比，具有多孔性，容易吸湿，焊剂颗粒强度稍弱，但制造简单，原料选择比较方便，能将合金元

表 2-47　不锈钢埋弧焊用烧结焊剂的牌号和主要化学成分及主要用途[4]

焊剂牌号	焊剂化学成分(质量分数)/%	熔敷金属化学成分(质量分数)/%	烘干温度与时间	主要用途
SJ225	$SiO_2+Al_2O_3+TiO_2$：35～50；MnO+CaO+MgO：30～50；CaF_2：5～15；S≤0.035；P≤0.040	配合 HD2209 焊带，C≤0.040；Si≤0.90；Mn：0.5～2.0；S≤0.020；P≤0.030；Cu≤0.75；Cr：21.5～23.5；Ni：7.50～9.50；Mo：2.5～3.5；N：0.08～0.20	300～350℃，烘焙 2h	配合焊带 HD2209 获得双相不锈钢堆焊金属；具有良好的耐蚀性
SJ226	$SiO_2+Al_2O_3+TiO_2$：35～50；MnO+CaO+MgO：30～45；CaF_2：5～15；S≤0.035；P≤0.040	配合 HD2205 焊带，C≤0.040；Si≤0.90；Mn：0.5～2.0；S≤0.020；P≤0.030；Cu≤0.75；Cr：21.5～23.5；Ni：5.50～7.50；Mo：2.5～3.5；N：0.08～0.20	300～350℃，烘焙 2h	配合焊带 HD2205 获得双相不锈钢堆焊金属；具有良好的耐蚀性
SJ303	SiO_2：20～40；MgO+CaO+MgO：25～40；$Al_2O_3+TiO_2$：15～25；CaF_2：5～10；S≤0.035；P≤0.040	① FX308-E，C≤0.060；Si≤1.00；Mn≤2.5；P≤0.030；S≤0.030；Ni：8.0～11.0；Cr：18.0～21.0；Cu≤0.75 ② FX308L-E，C≤0.035；Si≤1.00；Mn≤2.5；P≤0.030；S≤0.030；Ni：9.0～12.0；Cr：18.0～21.0；Cu≤0.75	300～350℃，烘焙 2h	配合 HD308、H00Cr21Ni10（HD308L）、H00Cr25Ni12(HD309L)、HD316L 等焊带可用于核容器、化工容器等不锈钢堆焊耐腐蚀层，铁素体含量为 3%～10%，耐腐蚀性能良好
SJ304	SiO_2：20～40；MgO+CaO+MgO：25～40；$Al_2O_3+TiO_2$：15～25；CaF_2：5～10；S≤0.035；P≤0.040			焊剂具有合金化特性，匹配焊带如 HD309LA 可用于普通化工容器、压力容器等不锈钢过渡层的堆焊
SJ305	SiO_2：20～40；MgO+CaO+MgO：25～40；$Al_2O_3+TiO_2$：20～30；CaF_2：5～10；S≤0.035；P≤0.040	FX347-E，C≤0.060；Si≤1.00；Mn≤2.5；P≤0.030；S≤0.030；Ni：8.0～12.0；Cr：18.0～21.0；Cu≤0.75；Nb：8C～1.0		焊剂具有合金化特性，匹配焊带，如 HD347L 可用于普通化工容器、压力容器等不锈钢过渡层的堆焊
SJ315	SiO_2：20～40；MgO+CaO+MgO：25～40；$Al_2O_3+TiO_2$：20～30；CaF_2：5～10；S≤0.035；P≤0.040			马氏体不锈钢带极埋弧带极堆焊焊剂，配合 HD0Cr13Ni4Mo 焊带，用于连铸、轧辊的堆焊，获得 0Cr13Ni4Mo 型堆焊金属。堆焊金属硬度 HRC34～45
SJ316	SiO_2：20～40；MgO+CaO+MgO：25～40；$Al_2O_3+TiO_2$：20～30；CaF_2：5～10；S≤0.035；P≤0.040	FX316-E，C≤0.035；Si≤1.00；Mn≤2.5；P≤0.030；S≤0.030；Ni：11.0～15.0；Cr：16.0～21.0；Mo：2.0～3.0；Cu≤0.75	300～350℃，烘焙 2h	配合 HD316L、HD309LMo 等焊带，用于尿素设备等含 Mo 不锈钢的堆焊，可用于高速堆焊，焊速可达 180～220mm/min

续表

焊剂牌号	焊剂化学成分(质量分数)/%	熔敷金属化学成分(质量分数)/%	烘干温度与时间	主要用途
SJ325	SiO_2:20～40;MgO+CaO+MgO:25～40;$Al_2O_3+TiO_2$:20～30;CaF_2:5～10;S≤0.035;P≤0.040	FX316-E,C≤0.035;Si≤1.00;Mn≤2.5;P≤0.030;S≤0.030;Ni:11.0～15.0;Cr:16.0～21.0;Mo:2.0～3.0;Cu≤0.75	300～350℃,烘焙 2h	马氏体不锈钢带极埋弧带极堆焊焊剂,配合 HD2Cr13 等焊带,用于连铸、轧辊的堆焊,获得 20Cr13 型堆焊金属。堆焊金属硬度 34～45HRC
SJ601	$SiO_2+Al_2O_3+TiO_2$:20～40;MnO+CaO+MgO:2～10;CaF_2:45～55;S≤0.035;P≤0.040	① H308,C≤0.08;Mn:0.5～2.50;Si:1.00;S≤0.030;P≤0.040;Cr:18.0～21.0;Ni:9.0～11.0;Mo:— ② H316L,C≤0.04;Mn:0.5～2.50;Si:1.00;S≤0.030;P≤0.040;Cr:17.0～20.0;Ni:11.0～13.0;Mo:2.00～3.00	300～350℃,烘焙 2h	不锈钢焊剂,配合 H0Cr21Ni10(H308)、H00Cr21Ni10(H308L)、H316L 等焊丝可用于不锈钢重要结构,也可配合 H00Cr25Ni12(H309L)用于异种钢的焊接 F308-H0Cr21Ni10 的力学性能:R_m≥520MPa,A≥30%;F316L-H00Cr19Ni12Mo2 的力学性能:R_m≥480MPa,A≥30%
SJ601A	$SiO_2+Al_2O_3+TiO_2$:25～40;MnO+CaO+MgO:2～10;CaF_2:45～55;S≤0.035;P≤0.035		350～400℃,烘焙 1.5～2h	配合 H2209 焊丝,用于焊接双相不锈钢,如 022Cr22Ni5Mo3N 双相不锈钢等钢种的焊接。也可用于其他超低碳不锈钢的焊接 与 H229 焊丝配合焊后熔敷金属的力学性能 R_m≥690MPa,A≥20%
SJ601HR	$SiO_2+Al_2O_3+TiO_2$:25～40;MnO+CaO+MgO:2～10;CaF_2:45～55;S≤0.030;P≤0.030	① H308L,C≤0.04;Mn:0.5～2.50;Si:1.00;S≤0.030;P≤0.040;Cr:18.0～21.0;Ni:9.0～11.0;Mo:— ②H316L:C≤0.04;Mn:0.5～2.50;Si≤1.00;S≤0.030;P≤0.040;Cr:17.0～20.0;Ni:11.0～13.0;Mo:2.00～3.00	350～400℃,烘焙 1～2h	不锈钢核电焊剂,熔敷金属具有良好的力学性能及抗腐蚀性能、焊缝金属抗裂性能良好。配合焊丝(如 H308L、H316L 等)用于核反应堆压力容器对接焊缝用不锈钢的焊接 F308L-H0Cr21Ni10 的力学性能:R_m≥480MPa,A≥25%;F316L-H00Cr19Ni12Mo2 的力学性能:R_m≥480MPa,A≥30%

续表

焊剂牌号	焊剂化学成分(质量分数)/%	熔敷金属化学成分(质量分数)/%	烘干温度与时间	主要用途
SJ602	$SiO_2+Al_2O_3+TiO_2$:25～40;MnO+CaO+MgO:5～15;CaF_2:45～55	①FX308L-E,C≤0.035;Si≤1.00;Mn≤2.50;S≤0.030;P≤0.020;Ni:9.0～11.0;Cr:18.0～21.0;Cu:≤0.75 ②FX316L-E,C≤0.035;Si≤1.00;Mn≤2.50;S≤0.030;P≤0.020;Ni:11.0～15.0;Cr:16.0～20.0;Cu:≤0.75 ③FX347L-E,C≤0.035;Si≤1.00;Mn≤2.50;S≤0.030;P≤0.020;Ni:9.0～12.0;Cr:18.0～20.0;Cu:≤0.75;Nb:8C～1.0	300～400℃,烘焙 2h	适用于 30～90mm 带极电渣堆焊,配合 HD309L、HD308L、HD347L 等焊带,可用于核容器、加氢反应器及压力容器等耐腐蚀不锈钢的堆焊,也可用于丝极堆焊及镍基带极堆焊
SJ608	$SiO_2+Al_2O_3+TiO_2$:25～40;MnO+CaO+MgO:5～15;CaF_2:45～55	配合 H308 焊丝,C≤0.08;Mn:0.5～2.50;Si≤1.00;S≤0.030;P≤0.040;Cr:18.0～21.0;Ni:9.0～11.0 熔敷金属力学性能(F308L-H0Cr21Ni10):R_m≥520MPa,A≥30%	300～350℃,烘焙 2h	配合 H308、H321 等焊丝焊接奥氏体不锈钢及相应级别的低温船用结构,配合超低碳不锈钢焊丝可以焊接超低碳不锈钢结构
SJ608A	$SiO_2+Al_2O_3+TiO_2$:25～40;MnO+CaO+MgO:5～15;CaF_2:40～50	配合 H308L 焊丝,C≤0.04;Mn:0.5～2.50;Si≤1.00;S≤0.030;P≤0.040;Cr:18.0～21.0;Ni:9.0～11.0 熔敷金属力学性能(F308L-H0Cr21Ni10):R_m≥520MPa,A≥30%,KV_2≥27J(−196℃)	300～350℃,烘焙 2h	配合 H308L 等焊丝焊接奥氏体不锈钢及相应级别的低温船用结构,配合超低碳不锈钢焊丝可以焊接超低碳不锈钢结构
SJ667	$SiO_2+Al_2O_3+TiO_2$:25～40;MnO+CaO+MgO:5～15;CaF_2:45～55	配合 H347 焊丝,C≤0.08;Mn:0.5～2.50;Si≤1.00;S≤0.030;P≤0.040;Cr:18.0～21.0;Ni:9.0～11.0 熔敷金属力学性能(F347-H0Cr21Ni10Nb):R_m≥520MPa,A≥25%	300～350℃,烘焙 2h	配合 H308、H347 等焊丝焊接含 Nb 或 Ti 的奥氏体不锈钢,也可以用于丝极堆焊
SJ701	$SiO_2+Al_2O_3+TiO_2$:55～65;、MnO+CaO+MgO:25～40;、CaF_2:5～15		300～400℃,烘焙 2h	配合 H0Cr21Ni10Ti、H308 等焊丝,焊接相应的耐酸不锈钢结构,特别适用于 H1Cr19Ni9Ti 含钛不锈钢的焊接

注:HD308、HD308L、HD309LA、HD309LMo、HD316L、HD347、HD347L 等焊带生产单位如下:天津金桥焊材集团有限公司、机械科学研究院哈尔滨焊接研究所、安泰科技股份有限公司、哈尔滨威尔焊接有限公司。HD2209、HD2205、HD2Cr13 等焊带生产单位如下:机械科学研究院哈尔滨焊接研究所、安泰科技股份有限公司、哈尔滨威尔焊接有限公司。

素任意地添加到焊剂中去，使焊缝金属得到所需的合金元素。我国黏结（陶质）焊剂有一种牌号为SJ524，它是用于超低碳不锈钢带极埋弧堆焊的，其工艺性能优良，堆焊金属具有优良的耐晶间腐蚀性能和抗脆化性能，可用于石油、化工容器、反应堆压力壳等内壁要求耐腐蚀的衬里带极堆焊。

使用这种焊剂时，要考虑到焊剂强度低，易碎成粉末，且吸湿性强等特点，要及时采取烘干、保持干燥及筛去过细粉末等措施来保证焊剂质量，提高焊接过程的稳定性。

2.4 不锈钢焊接用气体、器具和钨极

2.4.1 不锈钢焊接用气体

不锈钢气体保护焊有惰性气体保护焊和活化性（又称氧化性）气体保护焊两种。惰性气体保护焊用气体有氩、氦、氩-氦和氩-氢混合气体；活性气体保护焊用气体有氩、氧、氩-二氧化碳和氩-氧-二氧化碳等混合气体。

（1）氩气（Ar）

氩气是惰性气体，为单原子气体，它不与焊缝金属起化学作用，密度比空气大37%，使用时不易飘浮失散，所以是一种理想的保护气体。氩气的热导率小，高温时不分解吸热，电弧在氩气中燃烧时热量损失少，电离热低，故在各类气体保护焊中氩气保护焊的电弧燃烧稳定性最好。特别在熔化极氩弧焊时焊丝金属很易呈稳定的轴向射流过渡，且飞溅小。在熔化焊时得到广泛的应用。

氩气是分馏液态空气的副产品，所以其中常含有一定数量的氧、氮、二氧化碳及水分，会直接影响焊缝质量。因此，对氩气的纯度有一定的要求，氩气作为不锈钢焊接的保护气体时，其纯度（体积分数）要大于或等于99.9%。

有关氩气的质量技术指标，执行GB/T 4842—2006《氩》的规定，见表2-48。

表2-48 氩气的质量技术指标[17]

指标名称		纯氩气	高纯度氩气
氩气纯度(体积分数)/10^{-2}	≥	99.99	99.99
氢气含量(体积分数)/10^{-6}	≤	5	0.5
氧气含量(体积分数)/10^{-6}	≤	10	1.5
氮气含量(体积分数)/10^{-6}	≤	50	4
甲烷含量(体积分数)/10^{-6}	≤	5	1①
一氧化碳含量(体积分数)/10^{-6}	≤	5	
二氧化碳含量(体积分数)/10^{-6}	≤	10	
水分含量(质量分数)/10^{-6}	≤	15	3

①甲烷含量、一氧化碳含量、二氧化碳含量可单独测量。

（2）氦气

氦气（He）与氩气一样，是一种无色、无味的惰性气体，不与其他元素组成化合物，不溶于焊缝金属，是一种单原子气体。与氩气相比，性质有下列特点。

① 在氩气中容易引弧，电弧燃烧稳定而且柔和，氦气则较差。

② 同样的电流和弧长，氦的电离势高，氦弧的电压明显比氩弧高，所以氦弧的温度高，发热大且集中，这是氦弧焊的最大优点。同时氦的热传导系数大，有利于向被焊区输热，所

以在同等电流和弧长条件下，钨极氦弧焊的焊接速度可比钨极氩弧焊快 30%～40%，且可获得熔深较大的窄焊缝，焊接热影响区也明显减小。

③ 氦气的密度小，不易形成良好的保护罩，为了获得同样的保护效果，氦气流量必须比氩气流量大 2～3 倍。

由于氦气价格昂贵，所以应用受到限制。氦气的技术要求见表 2-49。

表 2-49　氦气的技术要求[18]

项目		指标			
		纯氦		高纯氦	超纯氦
氦气纯度(体积分数)/10^{-2}	≥	99.99	99.995	99.999	99.999
氖气含量(体积分数)/10^{-6}	<	40	15	4	1
氢气含量(体积分数)/10^{-6}	<	7	3	1	0.1
(氧气＋氩)含量(体积分数)/10^{-6}	<	5	3	1	0.1
氮气含量(体积分数)/10^{-6}	<	25	10	2	0.1
一氧化碳含量(体积分数)/10^{-6}	<	1	1	0.5	0.1
二氧化碳含量(体积分数)/10^{-6}	<	1	1	0.5	0.1
甲烷含量(体积分数)/10^{-6}	<	1	1	0.5	0.1
水分含量(体积分数)/10^{-6}	<	20	10	3	0.2
总杂质含量(体积分数)/10^{-6}	≤	100	50	10	1

(3) 氩-氦混合气体

氩气电弧稳定柔和，阴极清理作用好；氦气电弧发热量大且集中，有较大的熔深。采用氩-氦混合气体可以取长补短。其混合气体的体积分数通常为 ψ_{He} 75%～80%＋ψ_{Ar} 25%～20%。

(4) 氢气

氢气（H_2）是无色无臭的可燃性气体。氢的相对原子质量最小，可溶于水，导热性能好，分解时吸收大量的分解热。在氩气保护焊时，加入适量氢，可增大母材金属的输入热，提高电弧电压，从而提高热功率，增加熔透性且提高焊接速度和生产效率，同时还能防止焊缝产生咬边和抑制 CO 气孔的作用。氩-氢混合气体的应用只限于焊接不锈钢、镍基合金，因为氢在一定含量范围内对这些材料不会产生有害的冶金影响。常用的气体成分是 ψ_{Ar} 85%＋ψ_{H_2} 15%，采用此混合保护气焊接母材厚度为 1.6mm 以下的不锈钢对接接头时，焊接速度可比纯氩保护气快 50%。

氢气的技术要求见表 2-50。

表 2-50　氢气的技术要求[19]

项目名称		指　标		
		优等品	一等品	合格品
氢气的体积分数/10^{-2}	≥	99.95	99.50	99.00
氧的体积分数/10^{-6}	≤	0.01	0.20	0.40
氮加氢的体积分数/10^{-6}	≤	0.04	0.30	0.60
露点/℃	≤	−43	—	—
游离水/(mL/40L 瓶)		—	无游离水	≤100

注：管道输送以及其他包装形式的合格工业氢的水分指标由供需双方商定。

（5）氩-氧-CO_2三元混合气体

焊接不锈钢时，在氩气中加入适量的氧和CO_2气体，可使保护气体的氧化性增强，当焊丝采用喷射形式过渡到焊接熔池时，具有下列优点：可克服阴极漂移现象，使焊接电弧燃烧稳定；焊接过程中飞溅减少，焊缝成形良好，还可以减少咬边现象，易实现单面焊背面成形的工艺。

（6）二氧化碳（CO_2）

二氧化碳是氧化性保护气体，有固、液、气三种状态。工业用CO_2都是液态，常温下即可气化，使用方便，经济。一个容积为40L的标准钢瓶即可装入25kg的液态CO_2（按容积的80%计），剩余约20%的空间则充满气化了的CO_2。液态CO_2中可溶解质量分数为0.05%的水，多余的水则成自由状态沉于瓶底。这些水在焊接过程中随CO_2一起挥发并混入CO_2气体中，一起进入焊接区，成为主要的有害杂质，故焊前必须采取下列措施减少水分。

① 将新灌气瓶倒置2h，开启阀门将沉积在下部的水排出（一般排2～3次，每次间隔约30min），放水结束后将气瓶放正。

② 使用前先放气2～3min，因为上部的气体一般含有较多的空气和水分。

③ 在气路中设置高压干燥器和低压干燥器，进一步减少CO_2中的水分。一般用硅胶或脱水硫酸铜作干燥剂，吸水后可加热烘去水后多次重复使用。

④ 当瓶中气压降低到0.2MPa以下时，不得再使用。焊接用CO_2的技术要求见表2-51。

表2-51 焊接用CO_2的技术要求[20]

项目	组分含量		
	优等品	一等品	合格品
二氧化碳含量(体积分数)/10^{-2} ≥	99.9	99.7	99.5
液态水	不得检出		
油			
水蒸气+乙醇(质量分数)/10^{-2} ≤	0.005	0.02	0.05
气味	无异味		

注：对非发酵法所得的二氧化碳，乙醇含量不作规定。

（7）氧气（O_2）

氧在常温状态和大气压下，是无色无味的气体。在标准状态下，氧气密度为1.43kg/m³，比空气重（空气密度为1.29kg/m³）。氧气本身不能燃烧，是一种活泼的助燃气体。高压氧与油脂接触会自燃，并可能爆炸。

氧气常用作惰性气体保护焊的附加气体，但不超过混合气体体积分数的2.0%。在熔化极氩气保护焊时加入氧，可以细化熔滴，降低射流过渡的临界电流，克服电弧阴极斑点飘移，增加母材输入热，从而提高焊接速度。

工业氧气的技术要求见表2-52。

表2-52 工业氧气的技术要求[21]

项目	指标	
氧含量(体积分数)/10^{-2}≥	99.5	99.2
水	无游离水	

2.4.2 不锈钢焊接用器具

（1）减压器

减压器又称压力调节器，其作用是把储存在气瓶内的高压气体减压至焊接所需的压力，

并保持压力稳定。国产几种气体减压器型号和技术参数见表 2-53。

表 2-53　国产几种常用气体减压器型号和技术参数[1]

型号	使用介质	最大输入压力/MPa	最大输出压力/MPa	流量/(m^3/h)
YQY-05	氧气	15	1	25
YQY-08		15	2.5	50
YQY-12		15	2.5	160
YQQ-07	氢气	15	1.6	40
YQA-01L	氩气	15	0.6	1.92
AT-15		15	0.5	0.90
AT-25L		15	0.25	1.50
AT-30		15	0.5	1.80

(2) 流量计、气体配比器

转子流量计是气体保护焊中调节保护气体流量的一种仪器，流量的大小将对焊接接头质量有很大影响。对于混合气体保护焊还需气体配比器，是用来控制不同气体流量的装置。

有关转子流量计的型号及其技术数据见表 2-54。

表 2-54　转子流量计的型号及其技术数据

型号	公称尺寸 DN/mm	流量范围 /(L/min)	浮子材料	精度 (±)/%	耐压力 /MPa
LZB-6	6	0.67～6.7 1～10 1.7～17	铝 不锈钢 不锈钢	1.5 2.5 4	≤1.0
LZB-12	12	1.7～17 2.7～27 4.2～42	铝 不锈钢 不锈钢	1.5 2.5 4	≤1.0
LZB-15	15	4.2～42 6.7～67 10～100	铝 铝 不锈钢	1 1.5 2.5	≤0.6

(3) 手工钨极氩弧焊焊枪

手工钨极氩弧焊焊枪应具有焊条电弧焊用焊钳的功能，轻便、灵活，便于焊工在不同位置长时间不间断地工作，以及具有良好的绝缘性。对于水冷式焊枪要保证水流畅通，不能有堵塞和渗漏现象，不然在施焊过程中突然中断除会影响正常施工外，还会对焊接质量造成极大的影响。输送保护气体的管路要保持气流畅通，特别是新焊枪使用前，要将气体管路中残留的多余物吹除干净，这样才能保证输送气体的纯度，不然将会直接影响焊接接头质量。常用的气冷式和水冷式焊炬型号和技术数据见表 2-55。

表 2-55 几种国产手工钨板氩弧焊炬枪号及技术数据

型号	冷却方式	炬体角度/(°)	额定电流/A	持钨棒直径/mm	控制开关形式	质量/kg
QQ-85°/75A-C	气冷式	85	75	0.8;1.0;1.6	KM-1 微动开关	
QQ-75°/160A-C		75	160	1.6;2.0;2.5;3.0		0.18
QS-65°/160A-C	水冷式	65	160	1.6;2.0;2.5;3.0		0.22
QS-75°/315A-C		75	315	2.0;2.5;3.0;4.0		0.22
QS-75°/500A-C		75	500	4.0;5.0;6.0;7.0		0.22

2.4.3 钨极

钨极是钨极气体保护焊、等离子弧焊和切割用的电极。它具有耐高温（熔点温度为3410℃±10℃，沸点为5900℃）、电子发射能力较强的优点。

实践证明，用纯钨作为电极不够理想，必须在纯钨的基础上加一些电子发射能力很强的稀土元素，如钍、锶、铈、锆、镧等，更能发挥其作用。

钍钨极是在纯钨极配料中加入了质量分数不大于2.0%的氧化钍的电极，它具有降低空载电压，改善引弧、电弧稳定，增大许用焊接电流等优点。但钍有微量的放射性，对人体健康有害，使其应用受到一定的限制。

铈钨极是在纯钨极配料中加入了质量分数为2.0%左右的氧化铈的电极。铈钨极除了放射性剂量要比钍钨极低之外，它具有易于引弧，电弧稳定性好，阴极斑点小，压降低，烧损少等优点。因此，它是目前非熔化电极气体保护焊，以及等离子弧焊和切割用电极中应用最广的一种钨极。

有关钨极类别、牌号及其化学成分见表2-56；国外钨极型号化学成分见表2-57～表2-59。常用钨极载流能力见表2-60、表2-61。

表 2-56 钨极类别、牌号及其化学成分

钨极类别	牌号	化学成分(质量分数)/%						
		W	ThO_2	CeO	SiO_2	$Fe_2O_3+Al_2O_3$	Mo	CaO
纯钨极	W1	＞99.92	—	—	0.03	0.03	0.01	0.01
纯钨极	W2	＞99.85	—	—	总量不大于0.15			
钍钨极	WTh-7	余量	0.7～0.99	—	0.06	0.02	0.01	0.01
钍钨极	WTh-10	余量	1.0～1.49	—	0.06	0.02	0.01	0.01
钍钨极	WTh-15	余量	1.5～2.0	—	0.06	0.02	0.01	0.01
钍钨极	WTh-30	余量	3.0～3.5	—	0.06	0.02	0.01	0.01
铈钨极	WCe-5	余量	—	0.5	0.06	0.02	0.01	0.01
铈钨极	WCe-13	余量	—	1.3	0.06	0.02	0.01	0.1
铈钨极	WCe-20	余量	—	2.0	0.06	0.02	0.01	0.01
	WZr	≥99.2	ZrO:0.15～0.4;其他＜0.5					

表 2-57　国际标准化组织对钨电极的有关规定（ISO 6848）[22]

型号	化学成分/%			颜色标志	备注
	W	氧化物	其他		
WT	余	ThO_2:1.7～2.2	≤0.1	红色	钍钨极
WL15	余	LaO_2:1.3～1.7	≤0.1	金黄色	镧钨极
WC20	余	CeO_2:1.8～2.2	≤0.1	灰色	铈钨极
WL10	余	LaO_2:0.9～1.2	≤0.1	黑色	镧钨极
WZ8	余	ZrO_2:0.7～0.9	≤0.1	白色	锆钨极
WL20	余	LaO_2:1.8～2.2	≤0.1	天蓝色	镧钨极
WP	≥99.5	—	≤0.1	绿色	纯钨极
WT10	余	ThO_2:0.8～1.2	≤0.1	黄色	钍钨极
WT30	余	ThO_2:2.8～3.2	≤0.1	紫色	钍钨极
WZ3	余	ZrO_2:0.15～0.5	≤0.1	棕色	锆钨极
WT40	余	ThO_2:3.8～4.2	≤0.1	橙色	钍钨极
WY20	余	YtO_2:1.8～2.2	≤0.1	蓝色	钇钨极

表 2-58　美国焊接学会标准对钨电极的有关规定（AWS A5.12）[22]

型号	化学成分/%			颜色标志	备注
	W	氧化物	其他		
EWTh-2	≥97.30	ThO_2:1.7～2.2	≤0.1	红色	钍钨极
EWLa-1.5	≥97.8	La_2O_3:1.3～1.7	≤0.1	金黄色	镧钨极
EWP	≥99.95	—	≤0.1	绿色	纯钨极
EWCe-2	≥97.3	CeO_2:1.8～2.2	≤0.1	橙色	铈钨极
EWLa-1	≥98.3	La_2O_3:0.8～1.2	≤0.1	黑色	镧钨极
EWLa-2	≥97.3	La_2O_3:1.8～2.2	≤0.1	天蓝色	镧钨极
EWZ_1-1	≥99.1	ZrO_2:0.15～0.4	≤0.1	棕色	锆钨极
EWTh-1	≥98.3	ThO_2:0.8～1.2	≤0.1	黄色	钍钨极

表 2-59　日本工业标准对钨电极的有关规定（JIS Z 3233）[22]

型号	化学成分/%			颜色标志	备注
	W	氧化物	其他		
YWP	≥99.9	—	≤0.1	绿色	纯钨电极
YWTh-1	余	ThO_2:0.8～1.2	≤0.1	黄色	1%钍-钨电极
YWTh-2	余	ThO_2:1.7～2.2	≤0.1	红色	2%钍-钨电极
YWLa-1	余	La_2O_3:0.9～1.2	≤0.1	黑色	1%镧-钨电极
YWLa-2	余	La_2O_3:1.8～2.2	≤0.1	黄色	2%镧-钨电极
YWCe-1	余	CeO_2:0.9～1.2	≤0.1	桃色	1%铈-钨电极
YWCe-2	余	CeO_2:1.8～2.2	≤0.1	灰色	2%铈-钨电极

表 2-60 常用钨极载流能力[23]

钨极直径/mm	直流/A		交流/A					
	正接	反接	非对称波形			对称波形		
	EWP EWTh-1 EWTh-2 EWTh-3	EWP EWTh-1 EWTh-2 EWTh-3	EWP	EWTh-1 EWTh-2 EWZr	EWTh-3	EWP	EWTh-1 EWTh-2 EWZr	EWTh-3
0.26	≥15	①	≥15	≥15	①	≥15	≥15	①
0.51	5～20	①	5～15	5～20	①	10～20	5～20	10～20
1.02	15～80	①	10～60	15～80	10～80	20～30	20～60	20～60
1.59	70～150	10～20	50～100	70～150	50～150	30～80	60～120	30～120
2.38	150～250	15～30	100～160	140～235	100～235	60～130	100～180	60～180
3.18	250～400	25～40	150～210	225～325	150～325	100～180	160～250	100～250
3.97	400～500	40～55	200～275	300～400	200～400	160～240	200～320	160～320
4.76	500～750	55～80	250～350	400～500	250～500	190～300	290～390	190～390
6.35	750～1000	80～125	325～450	500～630	325～630	250～400	340～525	250～525

① 一般不采用。

表 2-61 脉冲 TIG 焊推荐用钨极端部形状尺寸及许用电流[23]

钨极直径/mm	锥度/(°)	平顶直径/mm	恒定电流范围/A	脉冲电流范围/A
1.0	12	0.12	2～15	2～25
	20	0.25	5～30	5～60
1.6	25	0.5	8～50	80～100
	30	0.75	10～70	10～140
2.4	35	0.75	12～70	10～140
	45	1.10	12～90	12～180
3.6	60	1.10	20～200	20～300
	90	1.50	25～250	25～350

2.5 国外不锈钢焊接材料简介

2.5.1 各国不锈钢焊条型号对应关系

我国 GB/T 983—2012《不锈钢焊条》型号编排规则基本上采用美国 AWS A5.4M：2006《耐蚀铬钢及镍钢焊条》的规定。我国不锈钢焊条牌号、型号与美国 AWS A5.4M 标准的对应关系见表 2-4、表 2-6、表 2-62。日本工业标准 JIS Z3221 不锈钢焊条标准直接采用美国 AWS A5.4M 标准焊条类别号，只是在焊条型号的三个数字前加“D”而不是“E”，例如 JIS D308L-16，JIS D316-16 等，日本不锈钢焊条与中国不锈钢焊条对应关系见表 2-62。韩国的 KS 标准也采用 AWS 类别号，只是在焊条型号的三个数字前加“D”而不是“E”，例如 KS D308L-16，KS D316-16 等。

2.5.2 各国不锈钢焊丝型号对应关系

各国不锈钢实心焊丝型号对应关系见表 2-63，各国药芯焊丝型号对应关系见表 2-64。

表 2-62　国内外不锈钢焊条对照

中国 GB	美国 AWS	日本 JIS	德国 DIN	法国 NF	英国 BS	瑞典 ESAB	荷兰 NEN-ISO	瑞士 UTP
E209								
E219								
E240								
E307	E307		E188MnR28					
E308	E308	D308	E199R26 E199MPR36170 E199B20^{+}		E19. 9B E19. 9R E19. 9RMP	OK61. 53 OK61. 35		6820 68Kb
E308H	E308	D308						
E308L	E308L E308ELC	D308L	E199LR23 E199LB16 E199LR23150	EZ19. 9LR11023 EZ19. 9LR23 EZ19. 9LR15023 EZ19. 9LR16	E19. 9LR E19. 9LB	OK61. 30 OK61. 34 OK61. 41 OK61. 52	E199LR23 E199LR15036 E199LR16	68LC 68LCHL 684LC 6820LC
E308Mo	E308Mo		E20103MPR1231750			OK63. 32		
E308MoL								
E309	E309	D309	E2312MPR36170		E23. 12R	OK67. 62		6824
E309L	E309L	D309L	E2312LR23 E2312LB20	EZ23. 12LR12	E23. 12LAR	OK67. 60 OK67. 75	E2312LR23	6824LC
E309Nb								
E309Mo	E309Mo	D309Mo	E23133MPR36190 E22123LR23 E22123LR26150	EZ23. 12. 3LR23	E23. 12. 2LR	OK67. 70 OK67. 71 OK67. 72	E23122LR23	
E309MoL	E309MoL	D309MoL						

续表

中国 GB	美国 AWS	日本 JIS	德国 DIN	法国 NF	英国 BS	瑞典 ESAB	荷兰 NEN-ISO	瑞士 UTP
E310	E310	D310	E2520R26 E2520B20^{+}	EZ25. 20B20	E25. 20R E25. 20B	OK67. 13 OK67. 15 OK67. 26	E2520B	
E310H								
E310Nb								
E310Mo	E310Mo	d310Mo				OK67. 32		
E312	E312	D312	E299R23			OK68. 82 OK68. 81		
E316	E316	D316	E19123R26 E19123B20^{+} E19123MPR17036		E19. 12. 3R E19. 12. 3B E19. 12. 3RMP	OK63. 53 OK62. 52 OK63. 32		6820Mo 68MoKb
E316H								
E316L	E316L	D316L	E19123LR13150 E19123LR23 E19123LR13 E19123LR16 E19123LB20	EZ19. 12. 3LR23 EZ19. 12. 3LR15025 EZ19. 12. 3LR16	E19. 12. 3LR E19. 12. 3LAR	OK63. 20 OK63. 30 OK63. 34 OK63. 35 OK63. 41	E19123LR23 E19123LR15036 E19123LR26	68MoLC 68MoLCHL 684MoLC
E317	E317	D317	E19134LR26		E19. 13. 4BR	OK63. 80 OK63. 85 OK63. 91		
E317L	E317L	D317L	E18134LR23			OK64. 30		
E317MoCu	E316MoCu	D316LJ1L						
E318	E318	D318			19. 12. 3Nb. R 19. 12. 3Nb. B	OK62. 83		
E318V								
E320								
E320LR								

续表

中国 GB	美国 AWS	日本 JIS	德国 DIN	法国 NF	英国 BS	瑞典 ESAB	荷兰 NEN-ISO	瑞士 UTP
E330								
E330H								
E330MoMnWNb								
E347	E347	D347	E199NbR23 E199NbB20^{+}	EZ19.9NbLR23	19.9NbR 19.9NbB 19.9.9NbLAR	OK61.80 OK61.85	E199NbLR	68 6820Nb 68NbKb
E349	E349	D349						
E383								
E385			E20255LCuR			OK69.33		
E410	E410	D410	E13MPB20 E13B20^{+}		13.B	OK68.15 OK68.25 OK68.42		66
E410NiMo	E410NiMo		E134MPR23120			OK68.17		
E430	E430	D430	E17B20^{+}					
E502								
E503								
E630	E630	D630						
E16-8-2	E16-8-2	D16-8-2						
E16-25MoN								
E7Cr								
E5MoV								
E9Mo								
E11MoVNi								
E11MoVNiW								
E2209	E2209							
E2553	E2553							

表 2-63 各国不锈钢实心焊丝型号对应关系

中国	美国 AWS	日本	德国	荷兰	瑞士	英国	瑞典
H0Cr21Ni10	ER308	Y308	SGX5CrNi199	PZ6062 PZ6562		308S96	
H00Cr21Ni10	ER308L	Y308L	SGX2CrNi199	PZ6061 PZ6561	UTPA68620LC UTPA68LC	308S92	OKAutrod16.12 OKAutrod16.10 OKTigrod16.10
H0Cr24Ni13	ER309	Y309	SGX12CrNi2212	PZ6079 PZ6579	UTPA6824	309S94	OKAutrod16.52 OKAutrod16.53
	ER309L		SGX2CrNi2412	PZ6068 PZ6568	UTPA6824LC		
H1Cr26Ni21	ER310	Y310	SGX12CrNi2520	PZ6076 PZ6576	UTPA68H	310S94	
	ER312		SGX10CrNi309	PZ6066 PZ6566	UTPA651		
H0Cr19Ni12Mo2	ER316	Y316	SGXCrNiMo1911	PZ6074		316S96	
H00Cr19Ni12Mo2	ER316L	Y316L	SGX2CrNiMo1912	PZ6065 PZ6565	UTPA6820MoLC UTPA68MoLC	316S92	OKAutrod16.30 OKAutrod16.32 OKTigrod16.30
	ER317L		SGX2CrNiMo1816			317S96	OKAutrod16.34 OKTigrod16.34
	ER318		SGX5CrNiMoNb1912	PZ6071 PZ6571	UTPA6820MoNb UTPA68Mo	31896	OKAutrod16.31

续表

中国	美国 AWS	日本	德国	荷兰	瑞士	英国	瑞典
H0Cr20Ni14Mo3	ER317	Y317					
H0Cr20Ni10Ti	ER321	Y321					
H0Cr20Ni10Nb	ER347	Y347	SGX5CrNiMoNb199	PZ6072 PZ6572	UTPA6820Nb UTPA68	347S96	OKAutrod16.11 OKTigrod16.11
H1Cr21Ni10Mn6							
H1Cr13	ER410	Y410	SGX8Cr14	PZ6078 PZ6578	UTPA66		
H1Cr17	ER430	Y430	SGX8CrTi18		UTPA660		
	ER502		SGX5CrMo5	PZ6044 PZ6544	UTPA64		

表 2-64　国内外不锈钢药芯焊丝对照[11]

中国			美国 AWS	日本				瑞典 SAB
旧牌号	新牌号	GB		JIS	日本焊材公司	神钢	油脂	
YA102	Y308	E308T×-×	E308T×-×	YF308C	WEL FCW 308T	DW308	GFW308	
YA002	Y308L	E308LT×-×	E308LT×-×	YF308LC	WEL FCW 308LT	DW308L	GFW308L	
YA302	Y309	E309T×-×	E309T×-×	YF309C	WEL FCW 309T	DW309	GFW309	
YA062	Y309L	E309LT×-×	E309LT×-×	YF309LC	WEL FCW 309LT	DW309L	GFW309L	OK14.22
YA312	Y309Mo	E309MoT×-×	E309MoT×-×	YF309MoC	WEL FCW 3MoT	DW309Mo	GFW309Mo	
YA042	Y309LMo	E309LMoT×-×	E309LMoT×-×	YF309MoLC	WEL FCW3MoLT	DW309MoL	GFW309MoL	
YA202	Y316	E316T×-×	E316T×-×	YF316C	WEL FCW 316T	DW316	GFW316	
YA022	Y316L	E316LT×-×	E316LT×-×	YF316LC	WEL FCW 316LT	DW316L	GFW316L	OK14.21
YA132	Y347	E347T×-×	E347T×-×	YF347C	WEL FCW 347T	DW347	GFW347	OK14.34
	R308L	R308LT1-5	R308LT1-5					OK16.10
	R309L	R309LT1-5	R309LT1-5					OK16.53
	R316L	R316LT1-5	R316LT1-5					OK16.30
	R347	R347T1-5	R347T1-5					

参 考 文 献

[1] 张其枢，堵耀庭．不锈钢焊接．北京：机械工业出版社，2003.
[2] 吴树雄，尹士科编著．电焊条选用指南．第2版．北京：化学工业出版社，2002.
[3] GB/T 983—2012. 不锈钢焊条．
[4] 机械科学研究院哈尔滨焊接研究所．焊接材料产品手册．北京：机械工业出版社，2012.
[5] AWS A5.4：2006. 耐蚀铬钢及铬镍钢焊条．
[6] HG/T 20581—2011. 钢制化工容器材料选用规定．
[7] NB/T 47015—2011（JB/T 4709）．压力容器焊接规程．
[8] 于启湛，丁成刚，史春元．不锈钢的焊接．北京：机械工业出版社，2009.
[9] YB/T 5092—2005. 焊接用不锈焊丝．
[10] YB/T 5091—1993. 惰性气体保护焊接用不锈钢棒及焊丝．
[11] 河北鑫达耐磨焊条有限公司焊材样本．
[12] GB/T 17853—1999. 不锈钢药芯焊丝．
[13] 何少卿，王朝前，吴国权．药芯焊丝及应用．北京：化学工业出版社，2009.
[14] GB/T 29713—2013. 不锈钢焊丝和焊带．
[15] NB/T 470118.5—2011. 承压设备用焊接材料订货技术条件 第5部分：堆焊用不锈钢焊带和焊剂．
[16] 薛松柏等．焊接材料手册．北京：机械工业出版社，2006.
[17] GB/T 4842—2006. 氩．
[18] GB/T 4844—2011. 纯氮、高纯氮和超纯氮．
[19] GB/T 3634.1—2011. 氢气 第1部分：工业氢．
[20] HG/T 2537—1993. 焊接用二氧化碳．
[21] GB/T 3863—2008. 工业氧．
[22] 尹士科．焊接材料实用基础知识．北京：化学工业出版社，2004.
[23] 邹增大主编．焊接材料、工艺及设备手册．北京：化学工业出版社，2001.

第3章 不锈钢的焊接性能

3.1 不锈钢的腐蚀机理

不锈钢（金属）受介质的化学及电化学作用而破坏的现象称为腐蚀。不锈钢腐蚀主要有均匀腐蚀、晶间腐蚀、点腐蚀、选择性腐蚀和应力腐蚀断裂等。本节主要介绍晶间腐蚀、应力腐蚀断裂[1]。

（1）晶间腐蚀

在腐蚀介质作用下，沿着或紧挨着不锈钢晶粒边界发生的电化学腐蚀形态称为晶间腐蚀。不锈钢用于可能引起晶间腐蚀的环境时，应按 GB/T 4334.1～4334.5《不锈钢腐蚀试验方法》进行晶间腐蚀倾向性试验。不锈钢压力容器晶间腐蚀试验方法、受检试件状态、验收要求应按 GB/T 21433《不锈钢压力容器晶间腐蚀敏感性检验》的相关规定执行。下述介质在足够浓度和一定温度下属于具有对不锈钢产生晶间腐蚀能力的介质。

无机酸：硝酸、硫酸、盐酸、磷酸、铬酸、亚硫酸、氢氟酸、氢溴酸、氢碘酸、氢氰酸、氯氰酸、氨基磺酸、次氯酸等。

有机酸：工业乙酸、乙酸酐、甲酸、草酸、乳酸、乙二酸、丙二酸、苯二酸、环烷酸、水杨酸、脂肪酸、苹果酸、柠檬酸、马来酸、富马酸等。

盐类：硝酸铵、硝酸钙、硝酸银、硫酸铜、硫酸铁、硫酸钠、硫酸铝、硫酸氢钠、硫酸亚铁、亚硫酸铁、亚硝酸钙、氯化钠、氯化铁、氯化铬、次氯酸钠、氢氟酸钠等溶液。

其他：氢氧化钠、硫化铁、硫化铝、硫化钠、湿二氧化硫、三氯化铁、尿素氨基甲酸铵溶液、亚硫酸纸浆、牛皮纸浆、亚硫酸蒸煮液、玉米淀粉浆（由盐酸或硫酸制）、甜菜汁、石油原油、油田污水、海水、轻水堆高温水等。

奥氏体不锈钢的晶间腐蚀原因很多，主要有以下几方面。

① 碳化铬析出引起的晶间腐蚀。不锈钢在 300～950℃（奥氏体不锈钢在 450～800℃温度范围内加热或进行敏化处理时）温度范围内可能在晶界析出碳化铬，析出的碳化铬为 $Cr_{23}C_6$、$(Cr, Fe)_{23}C_6$ 或 $(Cr, Fe, Mo)_{23}C_6$，碳化铬沉淀于晶界（其铬含量常达 90%以上，大大高于不锈钢的平均铬含量）。由于铬的扩散速度慢，只有在晶界附近的铬扩散到晶界处形成碳化物析出，导致晶粒边界区域形成贫铬现象，如图 3-1 所示。当贫铬区的铬含量降低到小于 12.5%时，在腐蚀性介质作用下就会发生晶间腐蚀。

为了防止晶间腐蚀的产生，可采取如下方法：采用超低碳材料，尽量降低碳含量（<0.03%）；增加稳定化元素，如钛、铌等；固溶处理（1010～1120℃）、稳定化处理（适

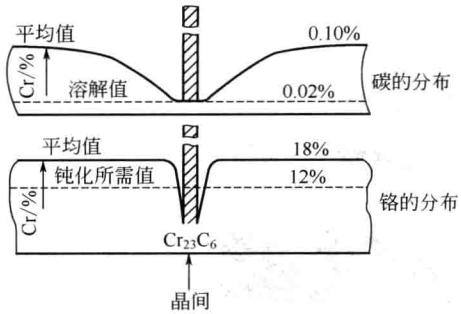


图 3-1 晶间腐蚀贫铬理论示意图

用于含稳定化元素的不锈钢）；加入能形成双相组织的元素，形成双相组织等。

② δ 相析出引起的晶间腐蚀。超低碳不锈钢，由于碳含量极低，可防止晶间析出 $Cr_{23}C_6$、$(Cr、Fe)_{23}C_6$ 引起的晶间腐蚀。但有些含钼奥氏体不锈钢，如 Cr17Ni13Mo2 在敏化温度区间晶间析出 δ 相，在特殊的腐蚀介质中（沸腾质量分数为 65% 的硝酸溶液），δ 相发生腐蚀，从而引起晶间腐蚀。

③ 晶界吸附引起的晶间腐蚀。该腐蚀是一种特殊条件下发生的晶间腐蚀。普通的 Cr18-Ni8 奥氏体不锈钢在强氧化性的硝酸溶液中会产生晶间腐蚀，而杂质极少的奥氏体不锈钢不发生上述现象。研究已表明，Cr14-Ni4 不锈钢中杂质磷在晶界吸附是导致其在硝酸溶液中产生晶间腐蚀的原因。

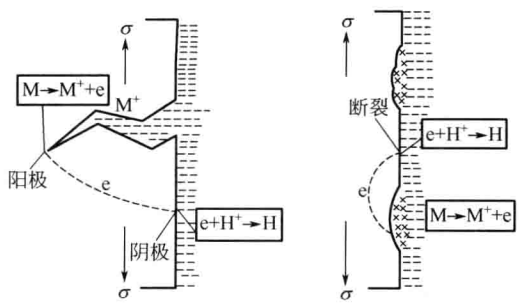
④ 稳定化元素高温溶解引起的晶间腐蚀。该腐蚀多发生于含 Ti 或 Nb 的奥氏体不锈钢，焊后若工件在敏化温度工作，焊接接头与强氧化性硝酸溶液接触，沿熔合区或紧邻熔合区的高温热影响区发生选择性腐蚀（狭长缝状的晶间腐蚀）。该腐蚀又称为“刀蚀”、“刀口腐蚀”或“刀线腐蚀”。

（2）应力腐蚀断裂（SCC）

应力腐蚀断裂是金属材料与特殊介质接触，并与较高的拉应力联合作用下而产生的脆性破裂现象。应力腐蚀与材质、介质有关，奥氏体不锈钢焊接接头易发生应力腐蚀断裂。

① 应力腐蚀的机理。应力腐蚀是指在静拉伸应力与电化学介质共同作用下，在阳极溶解过程中，阴极氢脆引起的断裂。在应力与腐蚀介质共同作用下，有 3 种不同类型的局部腐蚀，即应力腐蚀、氢脆和腐蚀疲劳。氢脆也是在静拉伸应力与电化学介质作用下产生的，但氢脆是由于阴极吸附而引起的断裂。图 3-2 是不锈钢应力腐蚀断裂（阳极溶解）和氢脆（阴极氢脆）模型。

腐蚀疲劳是由于除静拉伸应力外，还有交变周期的应力共同作用而引起的。



(a) 应力腐蚀断裂　　(b) 氢脆

图 3-2 不锈钢应力腐蚀断裂和氢脆模型

② 应力腐蚀断裂的条件。实验研究结果表明：不锈钢焊接结构在一定静拉伸应力、一定温度条件下的特殊介质联合作用下，才能发生应力腐蚀。其特殊条件如下。

a. 腐蚀介质条件。通常介质与被腐蚀材料之间有匹配性，并不是所有介质与任何材料之间都能发生应力腐蚀。表 3-1 是能够引起奥氏体不锈钢应力腐蚀的介质。

表 3-1　能够引起奥氏体不锈钢应力腐蚀的介质

介质种类	裂纹形式	介质种类	裂纹形式
硫酸铝	IT	氯化汞	IT
氯化铵	IT	氯代甲烷(含水)	T
硝酸铵	I	有机酸＋氯化物	T
氯化钡	IT	有机化物	T
氯化钙	IT	氯化钾	IT
氯化钴	T	氢氧化钾	T
氯代乙烷	IT	铝酸钠	IT
硅氟酸	T	氢氧化钠	IT
氢氟酸	IT	硫酸钠	IT
氯化氢	T	硫酸混合溶液①	IT
硝酸、盐酸、氢氟酸的混合液	IT	亚硫酸溶液	IT
氯化锂	IT	氯化锌	T
氯化镁	T		

① 含有 10g/L 的 Na_2S 及 30g/L 的 NaOH 的溶液，液体温度为 177℃，压力为 68.6～130MPa。

注：I 表示晶间裂纹；T 表示贯穿晶粒裂纹；IT 表示晶间裂纹及贯穿晶粒裂纹。

引起奥氏体不锈钢应力腐蚀的介质中，最重要的是溶液中 Cl^- 浓度和氧含量的同时作用。有些研究证明：尽管 Cl^- 浓度很高，若氧含量很少，也不会发生腐蚀裂纹。同样，如果 O_2 很多，若 Cl^- 较少时，也不会产生腐蚀裂纹，如图 3-3 所示。即两者必须共存。

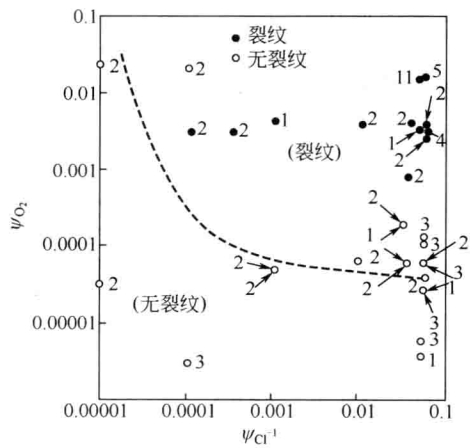


图 3-3　Cl^{-1} 和 O_2 的浓度对碱磷酸盐处理过的海水中不锈钢应力腐蚀敏感性的影响

（图中的数字表示试验次数）

b. 应力条件。应力腐蚀一般只在拉伸应力作用下产生，尤其是焊接结构中的焊接残余应力。当然还有工作应力的作用。消除残余应力是防止应力腐蚀的有效措施之一。

c. 材料条件。一般情况下，应力腐蚀都发生于合金材料，纯金属不发生应力腐蚀。特别是合金元素发生偏析时，产生晶界偏析会引起晶间型应力腐蚀断裂。

③ 应力腐蚀断裂的特征。从焊缝外观看，应力腐蚀裂纹无明显的均匀腐蚀痕迹，且多

层龟裂形式、断断续续的而且多数为横向裂纹。对于奥氏体不锈钢，介质不同，断裂性质就会发生变化，也会出现沿晶断裂的情况，或者穿晶和沿晶的混合性质的断裂，如表 3-2 所示。

表 3-2 Cr-Ni 奥氏体不锈钢的应力腐蚀形式

序号	腐蚀介质	裂纹形式
1	各种氯化物或含氯化物的介质	×或×+○
2	海水，河水，盐水，高温高纯水，海洋大气	×或×+○
3	碱溶液	×或×+○
4	氢氟酸或氟硅酸	×或×+○
5	硫酸、亚硫酸盐	×+○
6	酸洗液（$HCl+HNO_3+HF$ 水溶液）	×+○
7	硫化氢水溶液	×
8	硝酸和硝酸盐	○

注：×表示穿晶开裂；○表示沿晶开裂。

由于构件的材质、服役环境、承受载荷及应力状态不同，应力腐蚀裂纹的扩展途径也有很大不同。其扩展大体分为以下 3 种类型。

① 深向扩展型。由起裂点开始，一直向纵深扩展，很少有分支。这种应力腐蚀主要以穿晶（TG）形式扩展。

② 横向扩展。由起裂点开始，不是向深处发展，而是横向扩展，形成树根状的密集分支。这种应力腐蚀裂纹也是以穿晶形式扩展。

③ 纵横扩展型。这种应力腐蚀裂纹扩展的途径兼有上述的扩展特征，即由起裂点开始，既向深处发展，又向横向发展，其扩展的途径具有沿晶（IG）的特征。上述 3 种类型的应力腐蚀扩展形态如图 3-4 所示。

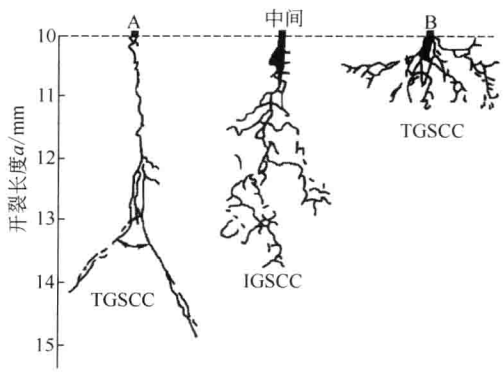


图 3-4 3 种类型的应力腐蚀扩展形态

3.2 奥氏体不锈钢的焊接性

奥氏体不锈钢焊接的主要问题是焊接接头晶间腐蚀、应力腐蚀开裂、焊接接头的热裂纹和焊接接头的力学性能的匹配等。

3.2.1　奥氏体不锈钢焊接接头的晶间腐蚀

晶间腐蚀是一种危险的破坏形式。18-8 型奥氏体不锈钢焊接接头一般有 3 个部位会出现晶间腐蚀现象，如图 3-5 所示。值得注意的是，在同一个接头上并不能同时看到 3 种晶间腐蚀区，这取决于钢的成分。

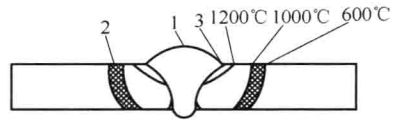


图 3-5　18-8 型奥氏体不锈钢焊接接头可能出现晶间腐蚀的部位

1—焊缝晶间腐蚀；2—母材上敏化区晶间腐蚀；3—刀蚀

（1）焊缝区晶间腐蚀

焊缝金属产生晶间腐蚀一般有两种情况：一是在焊态（即焊后未经热处理的状态），已有铬的碳化物的沉淀，因而形成贫铬层，它容易出现在焊接线能量过大或多层焊的条件下；二是在焊态具有较好的耐蚀性，如果焊后经受了敏化加热的条件，同样产生晶间腐蚀倾向。

在一般情况下，焊缝金属中碳含量对晶间腐蚀作用相当大。碳含量越高，晶间腐蚀倾向越大。因此为了防止晶间腐蚀应尽量降低碳含量，常用超低碳焊条或焊丝。

除尽量降低焊缝金属碳含量之外，还可以向焊缝金属中添加一定量的稳定化元素，如钛、铌等，焊缝金属中碳含量越高时，添加稳定化元素数量相应越多。因为稳定化元素钛或铌对氮也有很大的亲和力，在焊缝中不仅与碳结合，也可与氮结合，钛或铌的数量适量时能够稳定地固定碳。研究表明：18-8Ti 钢及其焊接接头，通过 GB/T 4334 标准中的试验方法 X 法、T 法及阳极法试验，当钛含量下限符合 $w_{Ti}/(w_C-0.02)\geqslant 8.5\sim 9.5$ 时耐腐蚀性能最好。

通常调整焊缝金属组织，同样可以改善焊缝金属抗晶间腐蚀能力。单相奥氏体组织的焊缝金属具有方向性强的柱状晶特征，经敏化处理后，如果出现贫铬层可以贯穿于晶粒之间而能构成腐蚀介质的集中通道，因而具有较大的晶间腐蚀倾向，如图 3-6 所示。若焊缝为 γ+δ 双相组织时，树枝晶被打散，对腐蚀介质不能构成集中的腐蚀通道，可以降低晶间腐蚀倾向。另外 δ 相的铬、碳化铬含量高，可以优先在 δ 相内部边缘沉淀，而不致在 γ 晶粒的晶界形成贫铬层，因此有 δ 相存在是有利的。

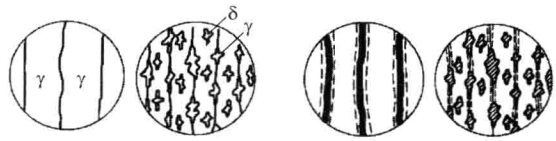


图 3-6　焊缝中 δ 相对晶间腐蚀通道的影响

综上所述，对于奥氏体不锈钢焊缝金属，δ 相的数量为 4%～12%比较适宜。实践证明，5%左右的 δ 相可以获得比较满意的抗晶间腐蚀性能[2]。

（2）母材上敏化区晶间腐蚀

母材上敏化区（450～850℃）晶间腐蚀的原因，如同焊缝金属晶间腐蚀，在母材不含稳定化元素或碳含量较高时，经过焊接热循环的作用，有敏化区产生，但热影响区的敏化区温度范围是 600～1000℃。这是因为焊接是一个快速的连续加热过程，而铬碳化物的沉淀是一个扩散过程，这样就需要有足够的时间才能充分进行扩散，所以焊接时铬碳化物的沉淀析出

必然需要较大的过热度。

因此，为防止在母材上产生敏化区腐蚀，选材料时，尽量降低钢的碳含量或选含有适量的稳定化元素的材料。制定工艺时，尽量减少热影响区处于敏化温度区间的时间，即采用小的焊接线能量或强制冷却，以加快冷却速度。

（3）刀蚀

刀蚀与焊缝金属晶间腐蚀产生条件不同，刀蚀只发生在含稳定化元素的奥氏体不锈钢的接头的过热区中，并且紧邻焊缝（含熔合区），腐蚀区宽度最大可达 1.0～1.5mm，具有晶间破坏性质。

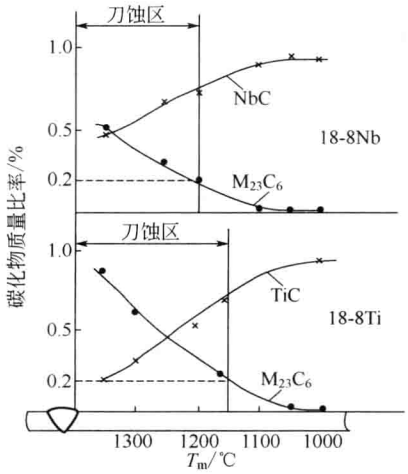


图 3-7 焊接热影响区碳化物的分布

超低碳奥氏体不锈钢一般无刀蚀现象。刀蚀是焊接接头出现的一种特殊形式的晶间腐蚀，也是和铬的碳化物（$M_{23}C_6$）的沉淀有密切关系的。如图 3-7 所示，从整个热影响区碳化物分布情况看，发生刀蚀的部位正是 $M_{23}C_6$（$Cr_{23}C_6$）沉淀最显著的部位。其产生原因应从高温过热和中温敏化两个顺序作用的热过程所引起的变化来分析。

奥氏体钢供货状态一般为固溶处理。以碳含量小于 0.08%的 18-8Ti 钢为例，一般经 1050～1150℃水淬固溶。这种钢中少部分碳（约 0.02%）和极少量的钛溶入固溶体，其余大部分碳与钛结合成为游离的 TiC，因为温度在 1150℃以下时 TiC 在钢中的溶解度是很小的，如图 3-8 所示，若有少数碳同铬结合成 $Cr_{23}C_6$ 时，在固溶处理时必须全部溶入固溶体。但是焊接时，在温度超过 1200℃的过热区中，首先 TiC 可以不断地向奥氏体中溶解而形成固溶体。峰值温度越高，TiC 的固溶量越多。这时在过热区中只有少量大块的 TiC 和 TiN 不能发生固溶，TiC 溶解时，分离出来的碳原子将插入到奥氏体点阵间隙中，而钛则占据奥氏体点阵节点的空缺位置。随后冷却时，由于高温下碳原子极为活跃，比钛的扩散能力强，碳原子将趋向奥氏体晶粒边界扩散移动，钛则来不及扩散而仍保留在奥氏体点阵节点上。因此，碳析出后集中于晶界附近成为过饱和状态。若随后再经 450～850℃中温敏化加热，碳原子可以优先以很快的速度向晶粒边界扩散，使晶界更富集碳。此时，铬的扩散虽不如碳快，但比钛的扩散要快，因而易于在晶界附近形成铬化物 $Cr_{23}C_6$ 的沉淀。TiC 固溶量越多的部位，$Cr_{23}C_6$ 的沉淀量越大，这个部位的晶间腐蚀倾向显得越严重。即刀蚀区和铬碳化物 $Cr_{23}C_6$ 的沉淀分布是一致的，因而表面为近缝区刀状腐蚀。由此可见，高温过热和中温敏化的敏化顺序加热是产生刀蚀的必要条件。

为防止产生刀蚀，通常采用超低碳不锈钢。有稳定化元素的不锈钢，碳含量应小于 0.06%。在焊接工艺上，要减少近缝区过热，要避免焊接时产生中温敏化的加热作用。如面向腐蚀介质的焊缝最后焊接，尽可能避免交叉焊缝，减少焊缝的接头等。双面焊缝中接触腐蚀介质的第 1 面焊缝无法安排在最后焊接时，应调整焊缝尺寸形状及焊接规范；使第 2 面焊缝产生的敏化温度区（600～1000℃）不落在第 1 面焊缝的过热区上，如图 3-9(a) 所示，否则，出现如图 3-9(b) 的情况时就会产生刀蚀。也可应用焊后稳定化处理改善抗刀蚀。

3.2.2 应力腐蚀开裂

应力腐蚀发生首先要有拉伸应力的作用，尤其是焊接结构的焊接应力的作用更不能忽视。奥氏体不锈钢的热物理性能导热性差，线胀系数大，在相同的焊接条件下，焊接残余应

力较大。因此应尽量降低工作应力、热应力、装配应力和焊接残余应力等。

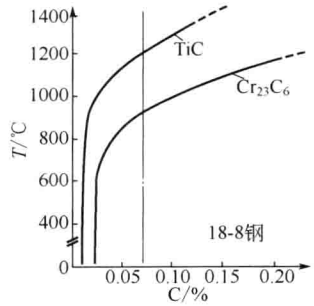


图 3-8　TiC 及 $Cr_{23}C_6$ 在 18-8 钢中的溶解度

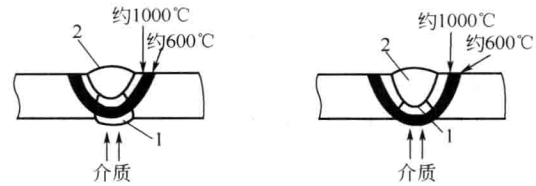


图 3-9　第 2 面焊缝的敏化区对刀蚀的影响

另外，为了防止应力腐蚀开裂，应合理调整焊缝成分。有些资料研究表明：对于同一母材双相钢 00Cr18Ni5Mo3Si2，采用 3 种不同成分的焊条焊接，在两种不同的腐蚀介质中的应力腐蚀开裂性能并不同，如表 3-3 和表 3-4 所示。

表 3-3　3 种焊条的应力腐蚀开裂试验（NaCl 25%＋$KClO_4$ 1%）

焊条	熔敷金属成分/%				外观检查
	C	Cr	Ni	Mo	
3RS61	0.033	21.21	10.09	2.77	200h 停试时无裂纹
P5	0.035	22.23	14.70	1.90	200h 停试时无裂纹
A302	0.050	22.70	10.90	—	77h 熔合线开裂，一个焊缝试样 88h 开裂，另一个焊缝试样 112h 开裂

表 3-4　3 种焊条的管板接头的应力腐蚀开裂试验（$MgCl_2$ 42%）

检验部位	开始出现裂纹的时间/h		
	3RS61	P5	A302
管板表面	66.66	66.66	66.66
管表面	84.84	无裂纹	100，无裂纹
焊缝表面	84.84	无裂纹	100，无裂纹

注：表中为两个试样的结果。

另外，焊缝为 γ＋δ 双相组织，在氯化物介质中抗腐蚀能力并不亚于双相不锈钢。所以 Cr-Ni 奥氏体不锈钢中含有 δ 相时，在氯化物介质中是有利的，可降低应力腐蚀开裂倾向。

3.2.3　焊接接头的热裂纹

奥氏体不锈钢焊接时，焊缝和近缝区均可产生热裂纹，这是因为奥氏体不锈钢的物理性能有其独特之处。第一，焊缝金属结晶期间存在较大的拉应力，奥氏体不锈钢的热导率小和线胀系数大，在焊接局部加热和冷却的条件下，焊接接头在冷却过程中可形成较大的拉伸应力；第二，奥氏体不锈钢易形成方向性强的柱状晶的焊缝组织，有利于有害杂质的偏析而促使形成液态夹层，有利于产生热裂纹；第三，奥氏体钢含有硫、磷、锡和锑等形成夹层的杂质，硅和硼的作用较强，硼在铁及镍中的溶解度均为零，因此易于析集于晶界而引起裂纹，硅在镍含量较高的钢中很容易偏析，因而镍含量越高，硅越易促使增大焊缝热裂纹倾向。如表 3-5 所示。

表 3-5 硅偏析对焊缝热裂纹的影响[3]

试样	焊缝成分/%								热裂纹情况
	C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	S	P	
低 Ni 焊缝	0.15	15.85	11.90	2.70	2.63	1.78	0.023	0.013	不裂
高 Ni 焊缝	0.20	14.89	24.50	5.50	1.08	1.78	0.021	0.015	裂

如何防止奥氏体不锈钢产生焊接热裂纹呢？首先应严格限制有害杂质。通常采用同材质的焊缝金属，应选择 S、P 含量较低的焊接材料，选择母材时也是如此。还要采用双相组织，尤其是对于镍含量小于 10%～15% 的 18-8 系列的奥氏体不锈钢，提高焊缝抗裂性最有效的手段，就是使焊缝成为 γ+δ 双相组织。一般焊缝组织中 δ 相的数量超过 3% 就可以明显提高抗裂性，如图 3-10 所示。当含磷的质量分数超过 0.04%时，3%δ 相即可防止产生裂纹。这是因为 δ 相的存在有效地消除了 γ 相组织的方向性，起到细化组织的作用，使低熔点物质不能析集于少数晶界上，破坏低熔点物质的连续分布，减少了有害杂质的作用。

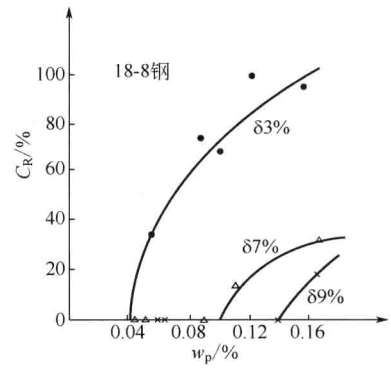


图 3-10 δ 相对 18-8 钢焊缝热裂纹倾向的影响

焊接镍含量超过 15%的奥氏体不锈钢，如长期在高温下工作时，采用 γ+δ 双相组织的焊缝是不适宜的。因为这要求焊缝中的 δ 相数量要多，才能满足抗裂性的要求。例如焊接 16Cr25Ni20Si2（1Cr25Ni20Si2）奥氏体不锈钢时，为防止焊缝热裂纹，焊缝的 δ 相数量要大于 25%～30%才可以收效。由此可见，为了获得一定量的 δ 相，势必要大幅度减少奥氏体化元素，同时增多铁素体化合金元素，这样引起焊缝金属成分与母材的匹配，势必影响焊接接头性能上的匹配性。

为了提高镍含量大于 15%的奥氏体不锈钢的抗裂性，可采用奥氏体加一次碳化物或奥氏体加硼化物的双相组织，这样不会有损于焊接接头的高温性能。同时严格限制有害杂质、合理调整熔敷金属化学成分进行合金化，也可防止焊缝产生热裂纹。表 3-6 是常用合金元素对焊缝热裂纹倾向的作用。

表 3-6 常用合金元素对焊缝热裂纹倾向的作用

元素	γ+δ(δ≤5%)时	γ 组织时
Cr	提高抗裂性，在 18-8 钢一般希望 Cr/Ni≈2.2～2.3	无坏作用。形成 Cr-Ni 共晶可细化组织
Ni	显著增大热裂纹倾向	显著增大热裂纹倾向
Si	减少热裂纹(Si≤1.5%～3.5%)	显著增大热裂纹倾向(Si≥0.3%～0.7%)
Mn	降低热裂纹倾向，若使 δ 相消失则增大热裂纹	显著提高抗裂性(Mn:4%～7%)
Ti	影响不大(Ti≤1.0%)	显著增大热裂纹倾向，当 Ti/C≈6 时可降低热裂纹倾向
Nb	影响不大(Nb≤1.2%)。但易区域偏析，可能局部产生微裂	显著增大热裂纹倾向，当 Nb/C≈10 时可降低热裂纹倾向
Mo	有一定好处	强烈降低热裂纹倾向
V	提高抗裂性。V≤1.5%，影响不大	稍增大热裂纹倾向，也有相反的结论
Al	降低热裂纹倾向	强烈增大热裂纹倾向
Cu	增大热裂纹倾向	影响不大(Mn 极少时) 显著增大热裂纹倾向(Mn≥2%)
C	增大热裂纹倾向	降低热裂纹倾向(C:0.3%～0.5%)并同时有 Nb 等

3.2.4　奥氏体不锈钢焊接接头的力学性能

铬镍奥氏体不锈钢用于耐蚀的工作环境下，其使用温度在常温或不太高的温度下(350℃以下)，对于接头的要求主要是耐蚀性，接头的力学性能，如塑性和韧性都能满足要求。

若用于高温环境，作为热强钢或在低温下工作时，则应注意低温脆化和高温脆化问题。

(1) 奥氏体钢焊缝的低温脆化

对低温韧性有特殊要求时，通常选用 18-8 钢，此时，应注意焊缝的组织状态对低温韧性影响很大，如表 3-7 所示。从表 3-7 可以看出，一般不能采用 γ+δ 双相组织，而应采用单 γ 组织的焊缝金属。

表 3-7　焊缝组织对低温韧性的影响

焊缝主要成分/%						焊缝组织	a_{kV}/(J/cm²)	
C	Si	Mn	Cr	Ni	Ti		+20℃	−196℃
0.08	0.57	0.44	17.6	10.8	0.16	γ+δ	121	46
0.015	0.22	1.50	25.5	18.9		γ	178	157

(2) 奥氏体焊缝的高温脆化

奥氏体焊缝中含有较多铁素体化元素或较多 σ 相时，都会引起显著的高温脆化现象。加热温度越高并且加热时间越长，脆化越严重。例如含 25%σ 相的 1Cr18Ni10VNb 焊缝，焊态时的 a_{kV} 为 83.5J/cm²；在 650℃ 加热 2h 后，a_{kV} 为 70.5J/cm²；在 650℃ 加热 200h 后，a_{kV} 只有 12.8J/cm²；在 750℃ 加热 2h 后，a_{kV} 为有 24.5J/cm²。所以，长期在高温下工作的焊缝金属中所含的 σ 相要小于 5%。含量较多的 σ 相引起脆化的原因，一般认为是 δ→σ 的结果。有的研究表明：在晶粒内部沉淀析出 σ 相的有害作用较小，而晶界上沉淀的 σ 相有害作用较大。另外，单向 γ 焊缝也会析出 σ 相。因此一旦出现 σ 相，脆化就比较严重。这时，如果出现 σ 相，可加热到 1050～1100℃ 保温 1h 后水淬，大部分 σ 相可重新溶解到奥氏体中去，可改善其塑性和韧性。

综上所述，奥氏体钢焊接接头的力学性能一般是可以满足要求的，只是在高温或低温下工作时要注意脆化问题。

3.3　马氏体钢及铁素体钢的焊接性

3.3.1　马氏体钢的焊接性

(1) 马氏体钢的分类

马氏体钢可分为两类：简单的 Cr13 马氏体钢，如 2Cr13、4Cr13 等；以 Cr12 为基础的多元合金化马氏体钢，如 1Cr12WMoV、1Cr12Ni3MoV 等。前者主要作为不锈钢使用，后者主要作为热强钢使用。

(2) 马氏体钢的焊接性

马氏体钢焊接的主要问题是焊接接头的冷裂纹和脆化现象。

淬硬性是产生冷裂纹的根本原因之一。而产品结构厚度或接头拘束度越大，钢中含碳量越高，则冷裂倾向越大。加之马氏体钢的导热性差，焊接残余应力较大，如再有氢的作用，

冷裂倾向会很明显。如采用焊条电弧焊焊接壁厚几十毫米的 1Cr12WMoV 马氏体钢管时，很容易出现冷裂纹；而焊接 1Cr12Ni3MoV 马氏体钢，板厚小于 6mm，采用 TIG 焊时很少发现冷裂纹。可见，虽然母材具有焊接冷裂倾向，但实际上焊接接头是否出现裂纹主要取决于具体的焊接生产条件。

马氏体钢有较大的晶粒粗化倾向。特别是多数马氏体钢（如以 1Cr13、Cr12 为基础的热强钢）的成分特点，使其组织往往处在马氏体-铁素体的边界上（舍弗勒图中的 M-A 边界）。在冷却速度较小时（例如 1Cr13 的冷却速度小于 10℃/s），近缝区就会出现粗大的铁素体和碳化物组织，因而塑性和韧性显著下降。若冷却速度大时，由于产生粗大的马氏体组织，塑性和韧性也要下降。所以，焊接时冷却速度的控制很重要。另外马氏体钢一般有回火脆性，在焊接前后的热处理过程中，对此要加以注意。

3.3.2 铁素体钢的焊接性

铁素体钢焊接时的主要问题之一，是近缝区晶粒急剧长大而引起的脆化。铁素体钢加热时没有相转变发生，这种晶粒粗化现象也不可能通过热处理来改善，因而会造成明显脆化的后果。同时由于高铬铁素体钢室温下韧性很低（见图 3-11），很容易在接头上产生裂纹。

高纯度的高铬铁素体钢有优秀的耐应力腐蚀开裂性能，而且纯度提高后缺口敏感性并不很大，室温及低温下的韧性显著提高，如图 3-12 所示。因而焊接时的裂纹倾向可显著降低。可见，尽量限制钢和焊缝中的碳、氮等杂质含量，可以显著改善可焊性。

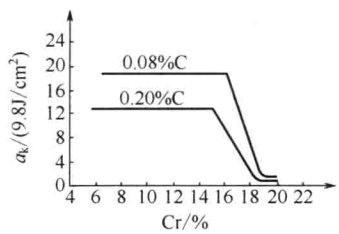


图 3-11 高铬铁素体钢在室温下的韧性

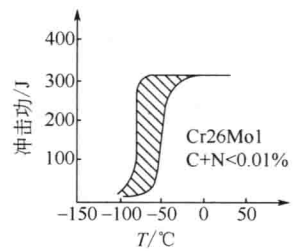


图 3-12 高纯度铝铁素体钢的冲击功

3.4 异种钢焊接性

在压力容器焊接生产中，通常会遇到不同钢种相互焊接的问题，即异种钢焊接。如复合钢板压力容器的焊接、容器不锈钢衬里塞焊、换热器的换热管与管板不同钢种的焊接等。

3.4.1 异种钢焊接存在的问题

（1）稀释问题

如果是珠光体钢与奥氏体钢形成的异种钢焊接接头，一般均应用 Cr-Ni 奥氏体钢或 Ni 基合金作为焊接材料。

假设用 18-8 钢（s）与低碳钢（m）焊接，如图 3-13 所示，焊接时两种母材都要熔入熔池。若不填充焊接材料，两种钢以同比例熔入焊缝，由图 3-14（舍夫勒图）求得图中点 a，通常认为这就是待焊母材。具有点 d 成分的母材再与成分为点 f 或点 f'的焊条金属相熔合后，构成焊缝金属，相应组成应在 a-f 或 a-f'的连线上并由熔合比的大小来决定。采用成分为 f'的焊条，熔合比高达 0.7 仍可保证焊缝不出现马氏体组织，而是单独相奥氏体，此

组织具有一定的热裂倾向。采用成分为 f 的焊条，则由 a-f 连线可得，如果熔合比控制在 0.3 以下，可得到 A+F(δ+γ) 双相组织。同样，应用焊条 18-8 型，其组成与母材相同，则焊缝金属的组成将在 a-s 线上，这时，只有控制熔合比小于 0.15 才能避免焊缝有马氏体产生。

因此，必须正确选择高合金的焊接材料，控制熔合比或稀释率。

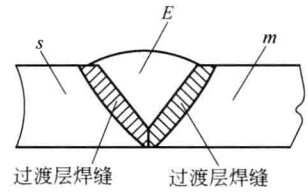


图 3-13　异种钢焊接示意图

s—18-8 不锈钢；m—低碳钢；E—焊条金属

(2) 凝固过渡层的存在

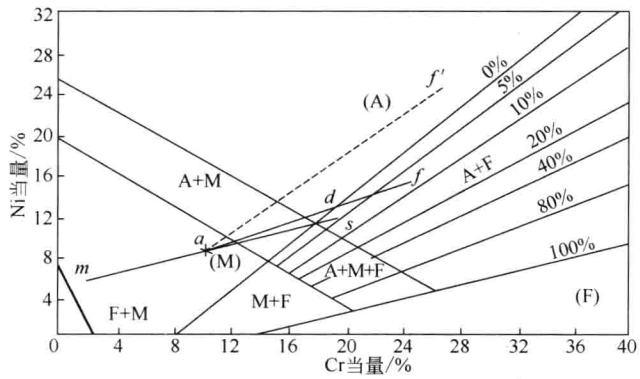


图 3-14　利用舍夫勒图确定异种钢焊缝组成[4]

s—18-8 不锈钢；m—低碳钢；a—s 与 m 等混合的组成

前面叙述的焊缝金属成分指的是平均成分。靠近熔合线的焊缝金属的成分有一定的浓度梯度。这种成分上的过渡变化区是由于熔池凝固特性造成的，所以称为凝固过渡层。一般增加焊缝金属的镍含量可以缩小过渡层。

(3) 碳迁移过渡层的形成

在异种钢焊接时，一般可以出现低合金钢一侧的碳通过焊缝边界向高合金焊缝中迁移扩散的现象，分别在焊缝边界两侧形成脱碳层和增碳层。即在低合金钢母材侧形成脱碳层，另一侧为增碳层，它们总称为碳迁移过渡层。由硬度试验可以测定碳迁移的存在，如图 3-15 所示。增碳层是由于碳扩散迁移而析出碳化物所造成的。由此形成的硬度突变现象对焊接接头性能有害。

(4) 残余应力的形成

异种钢焊接时，由于两种钢的线胀系数相差很大，不仅在焊接时会产生较大的残余应力，而且在使用中若有循环温度作用，也会形成热应力。由于残余应力的存在，常常影响工作性能。

3.4.2　异种钢的焊接法

(1) 隔离层堆焊法

异种钢焊接时，采用隔离层堆焊法，目的是防止形成凝固过渡层。如在珠光体钢与奥氏体钢焊接时，可先在珠光体钢侧的坡口上堆焊一层 Cr25Ni13 类型的奥氏体金属隔离层。然后检查隔离层无缺陷后，再焊接正式焊缝金属，这样奥氏体钢与隔离层间的连接就为奥氏体钢之间的焊接，所以较易焊接，其焊接方法如图 3-16 所示。

为防止出现碳迁移现象，同样可采用隔离层堆焊，通常首先在低合金钢或珠光体钢一侧

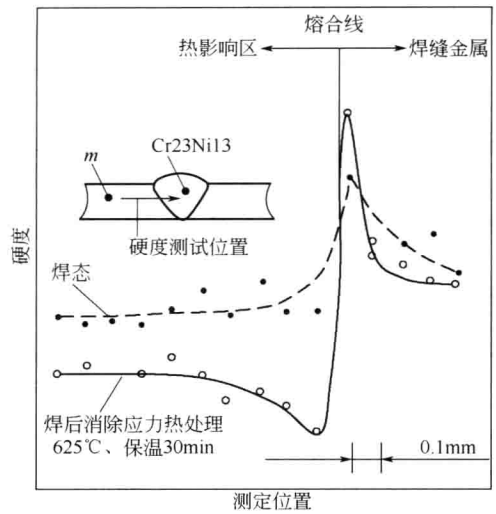


图 3-15 异种钢接头中脱碳层与增碳层的硬度变化

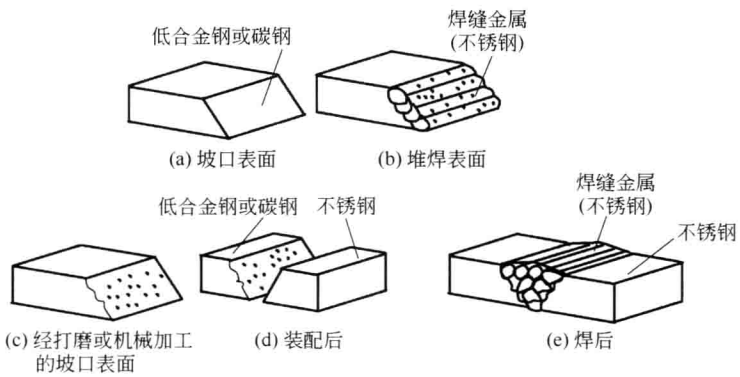


图 3-16 异种钢焊接隔离层焊接法

坡口上用钒、铌、钛含量较高的焊接材料堆焊第一层隔离层，然后再用相应的奥氏体焊接材料堆焊第二层隔离层。堆焊隔离层时，应尽可能采用小电流，快速施焊。最后，第二层隔离层与奥氏体钢焊接成为奥氏体钢与奥氏体钢之间的焊接。

除上述情况外，在特殊条件下，也可采用纯镍焊接材料先在低合金钢或珠光体钢坡口面上堆焊隔离层，然后进行隔离层与奥氏体钢之间的焊接。

（2）直接施焊法

采用高合金焊接材料直接焊接珠光体钢与奥氏体钢。焊接时应注意珠光体钢坡口面熔深应尽量小，选择合适的焊接材料，避免焊缝产生裂纹。该方法的焊接质量难控制，不常用。

（3）过渡区的应用

过渡区的利用，主要目的是防止碳迁移现象的产生和简化现场施焊工艺。选用钒、钛、铌含量较高的珠光体钢作为过渡区，首先与原珠光体钢焊接，即珠光体钢与珠光体钢焊接，然后再与奥氏体钢焊接。过渡区与奥氏体钢焊接可采用上述的隔离层堆焊和直接施焊法等。同样，在条件允许的情况下，先在车间用隔离层堆焊法焊成一个短的珠光体与奥氏体钢的异质焊接接头作为过渡区，然后在施工现场用小异质过渡区与珠光体钢和奥氏体钢焊接，变成为同质焊接，提高生产率，易于保证焊接质量。

3.4.3　复合钢的焊接

为了节约成本，对于要求有耐蚀性的压力容器，通常应用复合钢板。复合钢板是由较薄的不锈钢与较厚的珠光体钢复合轧制而成的双金属板。较厚的是珠光体钢，满足力学性能的要求；较薄的不锈钢覆层可为 Cr18Ni9Ti、Cr23Ni28Mo3Cu3Ti 等。覆层总是接触腐蚀介质，其厚度为板厚的 10%～20%。

焊接复合钢板，有其独特的焊接特点，焊接顺序可先从基体一侧开始焊接，也可先从覆层一侧开始焊接。此两种焊接顺序各有其不同的坡口形式，如图 3-17 所示。先从基体一侧开始焊接，基体焊完之后，可以应用铲根方式，也可以用预加工方式焊接覆层。用同样方法也可以先焊覆层，但先焊覆层的方法相对消耗不锈钢焊接材料较多，成本稍高，所以通常先从基体一侧开始焊接。

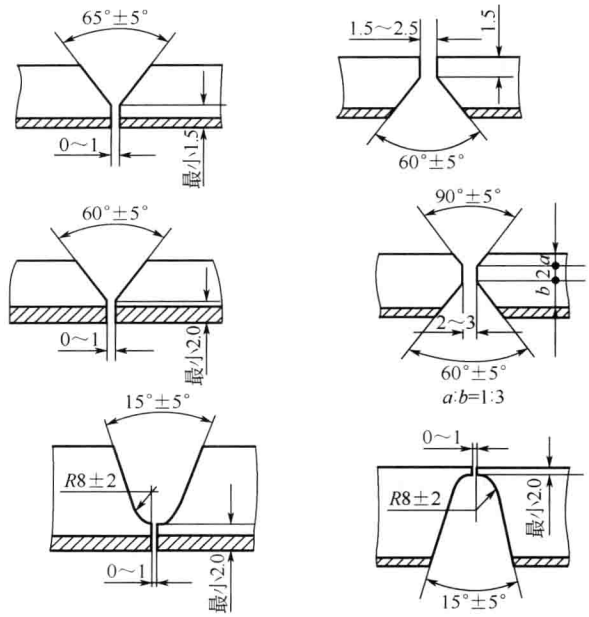


图 3-17　复合钢焊接时的坡口形式

为了保证复合钢板不失去原有的综合性能，覆层和基层要分别焊接。基体与覆层可分别选用各自适用的焊接材料焊接。

为避免焊接裂纹并且使覆层耐蚀性不降低，必须在覆层和基层之间采用过渡层焊缝，同时要注意基体材料的稀释作用，应先用铬、镍含量稍高的奥氏体填充金属来焊接过渡焊缝，以防止产生硬脆组织。

如果条件允许，复合钢的基体很薄时，也可用奥氏体填充金属焊接复合钢的全厚度。此时，要考虑基体材料的稀释作用，选择铬、镍含量较高的填充金属。

在压力容器制造中，有时也遇到复合钢与奥氏体不锈钢焊接，这时，可以采用图 3-16 所示的焊接顺序，先在复合钢的坡口面上用不锈钢焊接材料进行隔离层堆焊，然后再与不锈钢焊接。

参 考 文 献

[1]　高忠民．实用电焊技术．北京：金盾出版社，2003.
[2]　史耀武主编．焊接技术手册．福州：福建科学技术出版社，2005.
[3]　中国机械工程学会焊接学会．焊接手册：第 2 卷．第 2 版．北京：机械工艺出版社，2001.
[4]　张应力主编．新编焊工实用手册．北京：金盾出版社，2004.

第4章 奥氏体型不锈钢的焊接

本章主要介绍奥氏体不锈钢焊条电弧焊、埋弧焊、气体保护焊、等离子弧焊等焊接方法的焊接工艺。焊接工艺（welding technlog）是制造焊件所有关的加工方法和实施要求，包括焊接准备、焊接材料选用、焊接方法、焊接顺序、焊接参数、焊接操作（焊接操作welding operation，按照给定的焊接工艺完成焊接过程的各种动作的统称）要求及焊后处理要求。

4.1 焊条电弧焊

焊条电弧焊（shielded metal arc welding，SMAW）过去称之为手弧焊，它是焊接奥氏体型不锈钢常用的一种焊接方法。

4.1.1 焊条电弧焊的弧焊电源

（1）对弧焊电源的基本要求

① 应具有陡降外特性、良好的动特性和良好的调节特性。

② 合适的空载电压。为了保证焊工的安全和易引弧，弧焊电源应有合适的空载电压。交流焊机空载电压为65～85V，直流焊机空载电压为50～90V。

③ 合适的功率。为保证焊机在焊接过程中发热量不超过焊机额定的发热量，电焊机应有合适的功率。不锈钢产品焊接的最大焊接电流一般控制在200A左右，用老式大功率焊接电源在小电流段的性能往往不太好，难于保证电弧高度的稳定性，所以选用中、小功率新式焊机为好。为充分发挥设备的潜力并不超过焊机额定的发热量，焊接的最大许可焊接电流可按下式确定：

$$I = I_e \sqrt{\frac{Z_e}{Z}} \tag{4-1}$$

式中 I——实际暂载率为 Z 时所允许使用的最大焊接电流，A；

I_e——额定暂载率为 Z_e 时所允许使用的最大焊接电流（额定焊接电流），A；

Z_e——额定暂载率；

Z——实际暂载率。

（2）常用弧焊电源

① ZXG1-400系列弧焊电源。ZXG1-400系列整流弧焊电源是动圈式硅整流直流弧焊电源，此产品技术上比较成熟，较受焊工欢迎。这类弧焊整流器具备弧焊所要求的各种功能，

成本低、空载耗电量小，但噪声稍大，是焊接不锈钢常用的弧焊电源之一。

② ZX5-400 系列弧焊电源。ZX5-400 系列弧焊电源是晶闸管整流式直流弧焊电源，此产品技术上比较成熟，所以较受焊工欢迎。这类弧焊整流器具备弧焊所要求的各种功能，成本低、空载耗电量小，使用时噪声小，是焊接不锈钢常用的弧焊电源之一。

③ ZX7-250 系列逆变式弧焊电源。1977 年瑞典首次推出逆变式（变频式）弧焊电源，20 世纪 80 年代，我国逆变式弧焊整流器得到迅速发展。它是以工业用 50Hz/60Hz 频率的交流电，经整流后逆变成几千至几万赫兹的中频交流电，再经中频变压器降压后通过整流器、电抗器、滤波后得到焊接所需的电弧电压和焊接电流。这种设备耗材更少，体积更小，重量轻，具有良好的动特性，调节速度快，焊接参数均可无级调节。由于省去了铁芯变压器，空载损耗极少，只有数十到百余瓦，是一种高效节能的弧焊电源。

④ AXQ-320、AXC-400 焊机。AXQ-320 焊机是汽油机驱动的电焊机，额定焊接电流 320A，AXC-400 焊机是柴油机驱动的电焊机，额定焊接电流 400A，两者的缺点是噪声大、耗能大，属于淘汰产品。目前此类产品主要用于野外无电源的情况下使用。

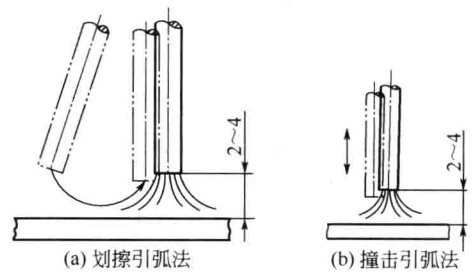
⑤ BX3-300 系列焊机。BX3-300 系列焊机是动圈式交流弧焊电源（又称弧焊变压器），其特点是设备结构简单、成本低，但电弧稳定性差（特别是焊接电流小于 90A 时），焊接过程中飞溅多，焊机噪声较大，一般用于焊接非重要焊接件。

4.1.2　焊条电弧焊的操作技术

（1）基本操作技术

① 引弧。引弧（stiking）：弧焊时，引燃焊接电弧的过程。焊条电弧焊采用接触法引弧，引弧方法有划擦法和撞击法两种。

a. 划擦法引弧。划擦法动作似擦火柴，将焊条引弧端对准待焊部位的焊缝或坡口面，利用腕力轻轻地在焊件表面划擦一下（划擦距离 10～15mm），然后迅速将焊条提起 2～4mm，引燃电弧，并使之稳定燃烧，如图 4-1(a) 所示。为了防止引弧处产生气孔，实际生产中碱性焊条一般采用划擦法引弧方法。



(a) 划擦引弧法　(b) 撞击引弧法

图 4-1　引弧方法

b. 撞击法（亦称直击法）引弧。撞击法引弧是将焊条引弧端对准待焊部位，然后手腕下弯，使焊条轻轻触击焊件，然后迅速将焊条提起 2～4mm，引燃电弧，并使之稳定燃烧，如图 4-1(b) 所示。这种引弧方法既不会使焊件表面划伤，又不受焊件表面大小、形状的限制，所以生产中主要采用撞击法引弧方法。撞击法引弧不能用力过大，否则容易将引弧端药皮碰裂甚至脱落，影响引弧和焊接。

引弧时需注意如下事项：引弧处应无油污、水、锈，以免产生气孔和夹渣；引弧时应在坡口内引弧，不允许在非焊接部位引弧，以避免由于引弧部位产生局部腐蚀；为了便于引弧，焊条末端应裸露焊芯，若未露焊芯，应用锉刀轻轻挫去少许药皮露出焊芯，切记不能用力敲击药皮，以防药皮脱落；旋转导电焊接夹具与不锈钢表面有良好的接触，接触不良会在不锈钢表面产生弧坑，从而引起局部腐蚀；产品施焊前需在不锈钢待焊面涂防飞溅剂。

② 运条。运条是整个焊接过程中最重要的环节，它直接影响焊缝的成形和内在质量。电弧引燃后，转为正常焊接，焊条要沿 3 个基本方向运动：一是朝熔池方向逐渐送进；二是沿焊接方向逐渐移动；三是横向摆动。可将这 3 个方向的运动，通称为运条。由于奥氏体不锈钢导热性较差，为了防止产生 σ 脆化相和接头在 450℃停留时间过长造成晶间腐蚀，焊接

时一般不作横向摆弧。

③ 焊道的连接。焊条电弧焊时，由于受焊条长度限制，不能用一根焊条完成一条焊缝，因而出现了焊道连接问题。焊道连接处容易产生夹渣、气孔等缺欠，因此为了保证焊道连接质量，使焊道连接均匀，避免产生过高、脱节、宽窄不一等缺欠，焊道连接时要选用恰当的方式。焊道连接有四种方式，如图 4-2 所示。

a. 在先焊焊道前面 10mm 处引弧，弧长比正常的弧长略长，然后将电弧移到原弧坑的 2/3 处，填满弧坑后即向前进入正常焊接，是使用最多的连接方式，如图 4-3 所示。这种连接方法必须注意电弧后移量，若电弧后移太多，则可能造成接头过高，若电弧后移太少则造成接头脱节、弧坑未填满，此种连接方法在接头时更换焊条愈快愈好，因为在熔池尚未冷却时进行连接，易引弧，且电弧稳定，焊缝成形好，接头质量好。

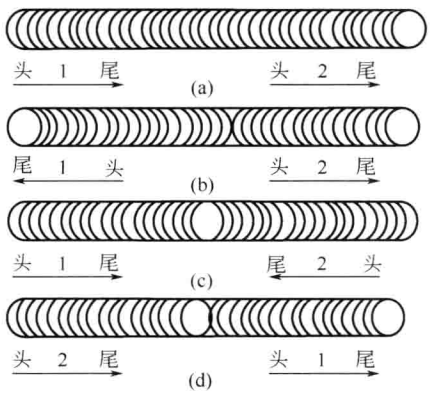


图 4-2 焊道接头的连接方式

1—先焊焊道；2—后焊焊道

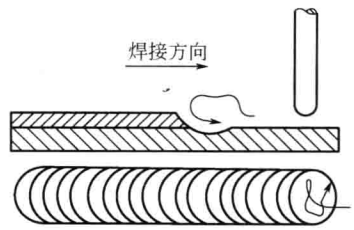


图 4-3 从先焊焊道末尾处接头的方法

b. 先焊焊道的起头处要略低些，连接时在先焊焊道的起头稍前处引弧，并稍微拉长电弧，将电弧引向先焊焊道的起头，并覆盖其端头处，等起头处焊道重熔焊平后再向先焊焊道相反方向移动，如图 4-4 所示。

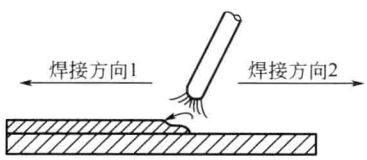


图 4-4 从先焊焊道起头处连接的方式

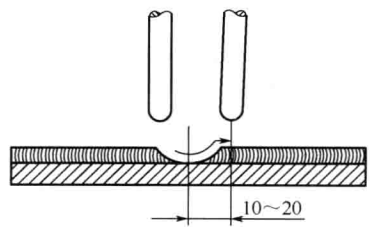


图 4-5 焊道接头的熄弧方式

c. 后焊焊道从接头的另一端引弧，焊到前焊道的结尾处，焊接速度略慢些，将先焊焊道的结尾处重熔，并填满焊道的弧坑，然后以较快的焊接速度再略向前熄弧，如图 4-5 所示。

d. 后焊焊道结尾与先焊焊道起头相连，利用电弧高温重新熔化先焊焊道的起头处，待首尾焊道接合处焊平后快速收尾。

④ 焊道的收尾。焊道的收尾是指一条焊缝焊完后如何填满弧坑。焊接过程中由于电弧吹力作用，熔池呈凹坑状，并且低于已凝固的焊道，若收弧时立即拉断电弧，会产生一个低凹的弧坑，过深的弧坑甚至会产生裂纹。因此收弧时不仅要熄弧，而且须填满弧坑。常用的

焊道收尾方式有三种。

a. 划圈收尾法。焊条移至焊道的终点时，利用手腕做圆圈运动，直到填满弧坑再拉高电弧至断电弧，如图 4-6 所示。该方法适用于厚板焊接，用于薄板焊接会有烧穿危险。

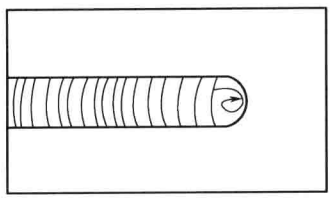


图 4-6　划圈收尾法

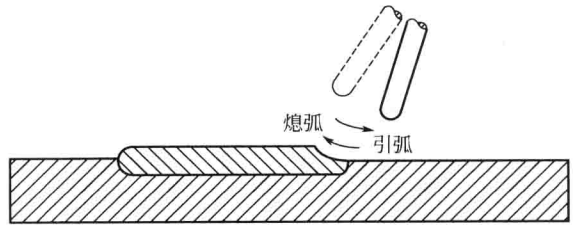


图 4-7　反复断弧收尾法

b. 反复断弧收尾法。焊条移至焊道终点时，在弧坑处反复熄弧、引弧数次，直到填满弧坑为止，如图 4-7 所示。该方法适用于薄板及大电流焊接，但不适用于碱性焊条，否则会产生气孔。

c. 回焊收尾法。焊条移至焊道收尾处即停止，并且适当改变焊条角度，如图 4-8 所示，即焊条由位置 1 转到位置 2，等填满弧坑后再转到位置 3 后缓慢拉断电弧，该方法适用于碱性焊条的焊接收尾。

（2）各种焊接位置的操作要点

各种焊接位置的操作有些共同的特点，但由于熔滴、熔池等在不同位置受重力的影响不同，在操作手法上也有所不同。

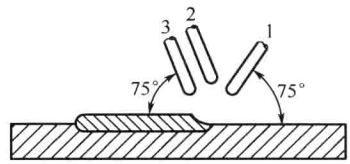


图 4-8　回焊收尾法

① 平焊的操作要点。

a. 焊接时熔滴金属主要靠自重自然过渡，操作技术比较容易掌握，允许用较大直径的焊条和较大的焊接电流。

b. 熔渣和液态金属容易混在一起，当熔渣超前时会产生夹渣。

c. 焊接单面焊背面成形的打底焊时，容易产生焊瘤、未焊透或背面成形不良。

平焊焊接时为获得优质焊缝，必须熟练掌握焊条角度和运条技术，将熔池控制为始终如一的形状与大小，一般熔池形状为半圆形或椭圆形，且表面下凹，焊条移动速度不宜过慢。

② 立焊的操作要点。

a. 液态金属和熔渣因自重下坠，故熔渣易分离。但熔池温度过高，液态金属易下流形成焊瘤。

b. 易掌握焊透情况，但表面易咬边，不易焊得平整，焊缝成形较差。

c. 焊缝处于垂直位置，由下向上进行施焊，焊接时焊条角度应向下倾斜 60°～80°，焊条燃烧端要向上挑动，才能保证立焊焊缝的质量，不然焊缝背面易形成焊瘤或者焊穿。电弧指向熔池中心，焊接电流要比平焊时小 20%～30%，以控制熔池温度。立焊时的奥氏体型不锈钢在立焊时横向收缩比平时的焊接电流大，故坡口根部间隙要稍大些。

③ 横焊的操作要点。

a. 液态金属因自重易下坠，焊缝往往上薄下厚，操作不当时，容易在上坡口形成咬边、下坡口会造成未熔合和夹渣。焊接时宜采用较小直径的焊条，焊条最大直径不超过 4mm。短弧焊接，由于上板的重力和焊接时的焊缝收缩变形大会造成较大的焊接应力，易使定位焊缝产生裂纹。一般要求定位焊缝的长度约为 30mm。

b. 液态金属与熔渣易分离。

c. 采用多层多道焊比较容易防止液态金属下坠。

根据横焊的特点，在焊接时由于上坡口温度高于下坡口，所以在上坡口处不做稳弧动作，而是迅速带至下坡口根部做轻微的横拉稳弧动作。若坡口间隙小时，增大焊条倾角，反之则减小焊条倾角。

④ 仰焊的操作要点。

a. 液态金属因自重下坠滴落，因奥氏体型不锈钢的热导率小，不容易散热，熔滴在高温时停留时间长，在重力作用下，为熔滴下落创造了条件，所以仰焊时不易控制熔池形状和大小，而且会造成未焊透和接头背面凹陷。因此焊接时宜采用较小直径的焊条（焊条最大直径不超过 4mm）和小焊接电流，并采用最短的电弧焊接。施焊时焊条不做横向摆动，以窄焊缝为宜。每层焊缝不应太厚，以防止液态金属过多而下坠。坡口角度比平焊略大，焊接第一层时，焊条与坡口两侧成 90°，与焊接方向成 70°～80°，用最短的电弧做前后推拉的动作。

b. 引燃电弧后应迅速将电弧顶至坡口，稍停，根部被熔透后再向前移动进行连续焊接。当焊缝的根部被熔透而出现小圆孔时，应迅速将焊条带至熔池后面而熄弧，并在熔池仍处在红热状态时再引弧，在原熔池的接头处继续焊接。整个焊接过程中始终保持电弧在半打穿钝边状态下运行焊条，即电弧一半在熔池中，另一半在不熔化的坡口上，焊条向前移动的速度要略快些，这样便可得到较薄的焊缝，并可克服焊缝凹凸不平的缺陷。

4.1.3 焊前准备

在某种程度上讲，焊接质量决定了产品的整体质量，所以为保证产品的焊接质量，必须做好各项准备工作。

（1）编制焊接工艺文件

焊接工艺文件种类较多，一般情况下，各个企业应根据每个产品的实际情况编制完整的《焊接作业指导书》（早期称其为《焊接工艺规程》）。一般《焊接作业指导书》应包括以下内容。

① 焊接方法（welding process）。应根据作业环境、焊缝位置、焊缝长度、企业现有的焊接设备、焊工的技能水平、焊接工艺评定覆盖范围等诸多因素确定。

② 坡口形式与坡口尺寸。坡口形式与尺寸见表 4-1、表 4-2，或根据不同板厚按 GB/T 985.1—2008《气焊、焊条电弧焊、气体保护焊和高能束焊的推荐坡口》和企业已评定合格的焊接工艺评定报告、企业坡口加工手段综合来确定坡口（groove）形式与坡口尺寸。

③ 焊接工艺参数（welding condition）。焊接时为保证焊接质量，而选定的诸物理量。焊接工艺参数包括电弧电压、焊接电流、电流种类、电极极性、焊接速度、焊接层数、焊接顺序、道间温度。

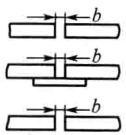
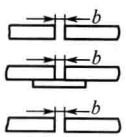
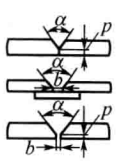
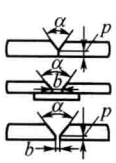
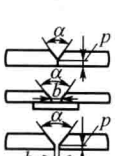
④ 焊条（covered electrode）的选择与烘干。

a. 焊条的选择。所选用焊条应能获得化学成分与母材金属相近的熔敷金属。为了确保焊缝金属的耐腐蚀性不低于母材金属。其铬、镍含量略高于母材金属含量，而碳含量又低于母材金属。焊条可按本书第 2 章表 2-4、表 2-6 选取。不锈钢压力容器用焊条选择见表 4-3、表 4-4。

b. 焊条重复烘焙次数的限制。焊条烘焙温度高于 350℃时，重复烘焙次数不宜超过 3 次。

c. 焊条消耗定额。对接接头对接焊缝每米焊缝所消耗焊条的重量，参见表 4-5，等边直角焊缝每米所消耗焊条的重量参见表 4-6。为了准确地计算焊条的消耗量，推荐下列计算公式。

表 4-1　对接接头的焊条电弧焊坡口形式及焊接参数[1]

板厚/mm	坡口形式	焊接位置	层数	坡口尺寸			焊接电流/A	焊接速度/(mm/min)	焊条直径/mm	备注
				间隙/mm	钝边/mm	坡口角度 α/(°)				
2		平焊	2	0～1	—	—	40～60	140～160	2.5	背面清根
		平焊	1	2	—	—	80～110	100～140	3.2	加垫板
		平焊	1	0～1	—	—	60～80	100～140	2.5	
3		平焊	2	2	—	—	80～110	100～140	3.2	背面清根
		平焊	1	3	—	—	110～150	150～200	4.0	加垫板
		平焊	2	2	—	75	90～110	140～160	3.2	
5		平焊	2	0	2	75	80～110	120～140	3.2	背面清根
		平焊	2	4	—	80	120～150	140～180	4.0	加垫板
		平焊	2	2	2	75	90～110	140～180	3.2	
6		平焊	4	0	0	80	90～140	160～180	3.2、4.0	背面清根
		平焊	2	4	—	60	140～180	140～150	4.0、5.0	加垫板
		平焊	3	2	2	75	90～140	140～160	3.2、4.0	
9		平焊	4	0	3	80	130～140	140～160	4.0	背面清根
		平焊	3	4	—	60	140～180	140～160	4.0、5.0	加垫板
		平焊	4	2	2	75	90～140	140～160	3.2、4.0	

续表

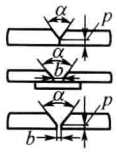
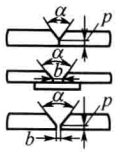
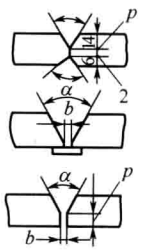
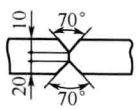
板厚/mm	坡口形式	焊接位置	层数	坡口尺寸			焊接电流/A	焊接速度/(mm/min)	焊条直径/mm	备注
				间隙/mm	钝边/mm	坡口角度 α/(°)				
12		平焊	5	0	4	80	140～180	120～180	4.0、5.0	背面清根
		平焊	4	4	—	60	140～180	120～160	4.0、5.0	加垫板
		平焊	4	2	2	75	90～140	130～160	3.2、4.0	
16		平焊	7	0	6	80	140～180	120～180	4.0、5.0	背面清根
		平焊	6	4	—	60	140～180	110～160	4.0、5.0	加垫板
		平焊	7	2	2	75	90～180	110～160	3.2、4.0、5.0	
22		平焊	7	—	—	60	140～180	130～180	4.0、5.0	背面清根
		平焊	9	4	—	45	160～200	110～175	5.0	加垫板
		平焊	10	2	2	45	90～180	140～180	3.2、4.0、5.0	
32		平焊	14	—	2	—	160～200	160～180	4.0、5.0	背面清根

表 4-2　角接接头、梯形接头的焊条电弧焊坡口形式及焊接参数[1]

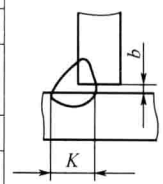
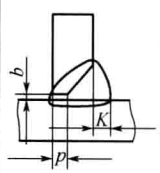
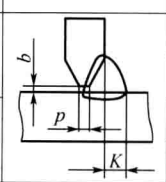
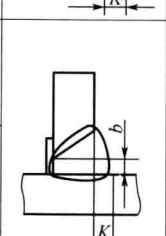
板厚/mm	坡口形式	焊脚尺寸/mm	焊接位置	层数	坡口尺寸			焊接电流/A	焊接速度/(mm/min)	焊条直径/mm	备注
					间隙/mm	钝边/mm	坡口角度 α/(°)				
6		4.5	平焊	1	0～2	—	—	160～190	150～200	4.0、5.0	背面清根
9		6	立焊	1	0～2	—	—	80～190	60～100	4.0、5.0	加垫板
12		7	平焊	2	0～2	—	—	160～190	150～200	3.2、4.0	
		9	平焊	3	0～2	—	—	160～190	150～200		
16		10	立焊	2	0～2	—	—	80～110	50～90		
22		12	平焊	5	0～2	—	—	160～190	150～200		
		16	立焊	9		—	—	80～110	150～200		
6		8	平焊	1～2	0～2	0～3	50	160～190	150～200	4.0、5.0	
		8	立焊	1～2	0～2	0～3	50	80～110	40～80	4.0、5.0	
12		15	平焊	8～10	0～2	0～3	50	160～190	150～200	3.2、4.0、5.0	
		15	立焊	3～4	0～2	0～3	50	80～110	40～80		
22		26	平焊	18～20	0～2	0～3	45	160～190	150～200		
		26	立焊	5～7	0～2	0～3	45	80～110	40～80		
12		9	平焊	3～4	0～2	0～2	50	160～190	150～200	5.0	
		9	立焊	2～3	0～2	0～2	50	80～110	40～80	3.2、4.0	
22		14	平焊	7～9	0～2	0～2	45	160～190	150～200	5.0	
		14	立焊	3～4	0～2	0～2	45	80～110	40～80	3.2、4.0	
6		9	平焊	2～3	3～6	—	50	160～190	150～200	5.0	加垫板
		9	立焊	2～3	3～6	—	50	80～110	40～80	3.2、4.0	加垫板
12		16	平焊	10～12	3～6	—	50	160～190	150～200	5.0	加垫板
		16	立焊	4～6	3～6	—	50	80～110	40～80	3.2、4.0	加垫板
22		27	平焊	22～25	3～6	—	45	160～190	150～200	5.0	加垫板
		27	立焊	10～12	3～6	—	45	80～110	40～80	3.2、4.0	加垫板

表 4-3 不锈钢压力容器焊条电弧焊用焊条[2,3]

钢材牌号	焊条牌号	GB/T 983	钢材牌号	焊条牌号	GB/T 983
S30408 06Cr19Ni10	A102 A107	E308-16 E308-15	S31683 022Cr18Ni14Mo12Cu2	A032	E317MoCuL-16
S30403 022Cr19Ni10	A002	E308L-16	S31708 06Cr19Ni13Mo3	A242	E317-16
	A002A	E308L-16	S31703 022Cr19Ni13Mo3		E317L-16
S32168 06Cr18Ni11Ti	A132 A137	E347-16 E347-15	S30908 0Cr23Ni13	A302	E309-16
S31608 06Cr17Ni12Mo2	A202 A207	E316-16 E316-15	S31008 06Cr25Ni20	A402	E310-16
S31603 022Cr17Ni12Mo2	A022	E316L-16	(4Cr25Ni20)	A432	E310H-16
S31688 06Cr18Ni12Mo2Cu2	A222	E317MoCu-16	(4Cr25Ni35)	A447	
06Cr17Ni12Mo2Ti	A022 A212	E316L-16 E318-16			

注：旧的不锈钢牌号以括号方式标注。

表 4-4 不锈钢压力容器焊条电弧焊用焊条（异种奥氏体不锈钢焊接）

母材	S30403	S30908	S31008	S31608	S31603	S31708	S32168
S30408	A002	A102 A302	A102 A302 A402	A102 A202	A102 A202	A102 A202 A242	A102
S30403		A102 A302	A302 A402	A102 A202	A002 A022	A202 A242	A002 A132
S30908			A302 A402	A302 A202	A302 A022	A302 A202	A302 A132
S31008				A202	A202	A242	A132 A402
S31608					A202	A202 A242	A132 A202
S31603						A242 A022	A202
S31708							A242 A132

$$C=\sum P_t L_h \tag{4-2}$$

式中 C——焊条消耗定额，kg；

P_t——单位长度焊缝的焊条消耗量，kg/m；

L_h——焊缝长度，m。

表 4-5　对接接头对接焊缝每米焊缝焊条的消耗量[1]　　kg

接头形式	钢板厚度/mm																
	2	3	4	5	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
对接接头，I 形坡口，单面焊缝	0.13	0.22	0.30														
对接接头，I 形坡口，双面焊缝			0.50	0.56	0.73	0.80											
对接接头，单 V 形坡口，单面焊缝					0.45	0.66	1.12	1.52	1.88	2.63	3.24	3.90					
对接接头，单 V 形坡口，对接焊缝					0.47	0.68	1.13	1.59	1.97	2.75	3.39	4.12					
对接接头，单 X 形坡口，对接焊缝								0.97	1.24	1.52	1.84	2.19	2.57	2.98	3.44	3.90	4.42
T 形接头，单 V 形坡口，对接焊缝					0.52	0.77	1.22	1.69	2.42	3.33	3.82	4.77	5.56				

注：不同直径的每千克焊缝需用焊条数量大致如下，ϕ5.0mm，焊条 13 根；ϕ4.0mm，焊条 20 根；ϕ3.2mm，焊条 34 根；ϕ2.5mm，焊条 56 根；ϕ2.0mm，焊条 78 根。

表 4-6 每米等边直角焊缝所需焊条消耗量[1]

焊脚尺寸/mm	焊条消耗量/kg	焊脚尺寸/mm	焊条消耗量/kg
3	0.07	6	0.306
4	0.137	7	0.419
5	0.214	8	0.548

d. 焊条烘焙。焊条烘焙温度和保温时间见表 4-7。

表 4-7 焊条烘焙温度和保温时间[3]

牌号	烘焙温度/℃	保温时间/h
A102	150	1
A107	250	1
A132	150	1
A137	250	1
A202	150	1
A207	250	1
A002	150	1
A022	150	1
A212	150	1
A242	150	1

⑤ 焊接工艺评定合格项目编号，对于重要产品的焊接接头工艺须经评定合格。

⑥ 对于重要产品的纵焊缝（如压力容器的 A 类焊缝）须提出制作产品焊接试件要求。

⑦ 对重要产品的焊缝须提出焊工资格要求。

⑧ 对焊缝提出外观检验要求，对重要产品的焊缝（如压力容器的 A、B 焊缝）还须提出无损检测要求。

（2）焊接工艺评定

根据产品设计、制造验收标准提出预焊接工艺规程（焊接工艺评定指导书），并规定焊接工艺评定应在产品施焊之前完成。

我国常见的焊接工艺评定标准有：

DL/T 868—2004《焊接工艺评定规程》

GB/T 19866—2005《焊接工艺规程及评定的一般原则》

GB/T 19868.1—2005《基于试验焊接材料的工艺评定》

GB/T 19868.2—2005《基于焊接经验的工艺评定》

GB/T 19868.3—2005《基于标准焊接规程的工艺评定》

GB/T 19868.4—2005《基于预生产焊接试验的工艺评定》

HG/T 3178—2002《尿素高压设备耐腐蚀不锈钢管子-管板的焊接工艺评定和焊工技能评定》

HG/T 3179—2002《尿素高压设备堆焊工艺评定和焊工技能评定》

HG/T 3180—2002《尿素高压设备衬里板及内件的焊接工艺评定和焊工技能评定》

JB/T 6963—1993《钢制件熔化焊工艺评定》

NB/T 47014—2011（JB/T4708）《承压设备焊接工艺评定》

SY/T 0452—2012《石油天然气金属管道焊接工艺评定》

（3）坡口的准备

① 坡口加工方法。坡口的加工方法，有机械加工和等离子弧切割方法，可根据构件的厚度和形状而确定。

② 坡口加工完毕后要进行检查。坡口加工完毕后要进行检查，对影响焊接质量的局部凹凸不平处应进行修理磨平；有裂纹、分层、夹渣等缺欠应清理干净，必要时须经渗透检测确认无缺陷后，方能施焊。

③ 焊件表面清理。焊件待焊处两侧各 20mm（包括坡口面）表面应彻底清理干净，不应有任何油脂、污渍、油漆标记、氧化皮和其他杂质。通常采用丙酮或酒精进行擦洗，必要时还需对坡口面进行打磨。若清理不干净，这些有机物质会在电弧高温作用下分解燃烧成气体，引起焊缝金属产生气孔和增碳，进而使焊接接头耐腐蚀性降低。

（4）施焊环境

焊条电弧焊时焊接场地风速不大于 10m/s，气体保护焊风速不大于 2m/s；相对湿度不大于 90%；要避免雨、雪、雾的直接影响；环境温度不得低于 0℃。另外焊接作业现场应保证足够的照明；有良好的安全防护措施，与易燃、易爆物品的距离应符合安全防护要求。

（5）焊后热处理

奥氏体不锈钢焊后一般不做消除应力热处理，为了防止晶间腐蚀进行固溶处理，对含有稳定化元素的不锈钢可进行稳定化处理。对焊缝表面颜色不符合要求的应进行返工或钝化处理。

4.1.4　装配定位焊

为了保证焊成的构件的最终形状和尺寸，组装焊件时既要按工艺需要留出坡口根部间隙，还必须考虑留出焊缝纵、横收缩量和角变形的反变形量。定位焊缝的参考尺寸见表 4-8。定位焊时，要注意下列事宜。

表 4-8　铬镍奥氏体型不锈钢定位焊缝的参考尺寸[1]　　mm

焊件厚度	定位焊缝		
	厚度	长	间距
2	不超过工件厚度的 2/3	4～8	30～50
3～5		10～20	50～80
＞5		20～30	150～300

① 定位焊缝所用焊条型号（或牌号）应与正式焊接时相同，但焊条直径可选细一些。

② 定位焊缝的焊接电流要比正式焊接时大一些，通常大 10%～15%，以保证焊透。

③ 定位焊缝的起弧和收尾处应圆滑过渡，以避免正式焊接时引起未熔合缺陷。发现定位焊缝有缺陷时，应将其清除干净后再重新进行定位焊，以保证定位焊缝质量。

④ 为了防止焊接裂纹和减少内应力，装配时要尽量避免强行组装。

⑤ 在焊缝交叉处和焊缝方向急剧变化处不应进行定位焊，应离开上述位置 50mm 以上进行定位焊。

⑥ 不等厚度奥氏体型不锈钢对接接头，要求将厚板一侧待焊处削薄至与薄板一侧厚度相同。这样可减少焊接应力集中，同时也便于操作。当薄板厚度 $\delta_{s1} \leqslant 10$mm，两板厚度差超过 3mm；若薄板厚度 $\delta_{s1} > 10$mm，两板厚度差大于 $30\%\delta_{s1}$，或超过 5mm 时，均应按图 4-9 要求削薄厚板边缘，或按同样要求采用堆焊方法将薄板边缘焊成斜面。厚板削薄长度的推荐公式为：

$$L_1、L_2 \geqslant 3(\delta_{s1}-\delta_{s2}) \tag{4-3}$$

式中 L_1，L_2——削薄长度，mm；

δ_{s1}——厚板的厚度，mm；

δ_{s2}——薄板的厚度，mm。

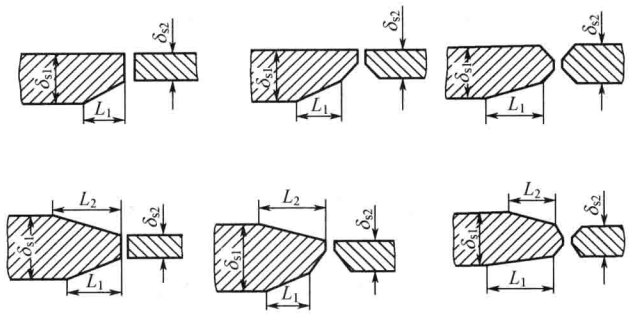


图 4-9 不等厚度不锈钢板的坡口加工

4.1.5 焊接工艺

(1) 压力容器焊缝组焊要求

① 不宜采用十字焊缝（低温容器不得采用十字焊缝）。相邻的两筒节间的纵焊缝和封头拼接焊缝与相邻焊缝应错开，其焊缝中心线间的外圆弧长一般应大于钢材厚度的 3 倍，且不小于 100mm。组装的筒体其最短筒节长度不小于 300mm[4]。

② 容器内件与壳体焊接的焊缝应尽量避开筒节间相焊及圆筒与封头相焊的焊缝。

③ 封头如果是拼接后成形，其拼接焊缝在成形前应打磨至与母材齐平。如果封头由成形瓣片和圆板对接拼制成时，焊缝方向只允许是径向和环向的。各不相交焊缝之间的最小距离应大于钢材厚度的 3 倍，且不小于 100mm[4]。

④ 尽量避免在容器焊缝及其边缘附近开孔。如必须开孔，则以开孔中心为圆心，以 1 倍开孔直径为半径的圆所包容的焊接接头都需经射线或超声无损检测判定为合格[4]。

⑤ 有耐腐蚀要求的不锈钢以及复合钢板，不得在耐腐蚀面采用硬印标记[4]。与腐蚀介质接触的焊缝应最后施焊。

⑥ 压力容器的 A、B 类焊接接头，焊后须按容器设计制造标准及设计图样要求进行无损检测（包括检测标准、检测比例、合格级别等）。当安全技术规范或设计、制造验收标准或设计文件有规定时，还应对 C、D 类焊接接头，甚至包括 A、B 类焊接接头做渗透检测。

(2) 错边量的控制

控制错边量的目的是为了减少接头的应力集中及附加弯曲应力。压力容器组装的对口错边量应符合表 4-9 的规定。

表 4-9 压力容器组装的对口错边量[4] mm

对口处钢板厚度 δ_s	焊接接头类别划分对口错边量 b	
	A	B
≤12	≤1/4δ_s	≤1/4δ_s
>12～20	≤3	≤1/4δ_s
>20～40	≤3	≤5
>40～50	≤3	≤1/8δ_s
>50	≤1/16δ_s，且≤10	≤1/8δ_s，且≤20

注：球形封头与圆筒连接的环向接头以及嵌入式接管与圆筒或封头对接连接的 A 类接头按 A 类焊接接头的对口错边量要求。

复合钢板的对口错边量以复层表面为基准，不论纵缝还是环缝，均不得大于覆层厚度的50%，且不大于 2mm[4]。

(3) 主要焊接参数

主要焊接参数见表 4-1、表 4-2。

① 焊接电流。焊接时，流经焊接回路的电流，称为焊接电流。从奥氏体型不锈钢性能上分析，它的电阻大且导热性差，与焊接同等厚度碳素钢相比，可以选择小的焊接电流；在保证焊透的情况下可适当地提高焊接速度。这样，焊接熔池所受到的热量会相对小些，有利于提高焊缝金属的抗腐蚀性能，又能减少焊后变形量。在施焊过程中，焊缝背面加紫铜垫板或者通水冷却等，都能减少焊接熔池热量，提高焊接接头耐腐蚀性。

a. 焊接电流值与焊条直径的关系。焊接电流值由焊条直径来确定，焊条直径由母材厚度来确定。焊条直径的选用，参见表 4-10。

表 4-10　焊条直径的选用　　mm

母材厚度	≥3	>3～5	>5～12	>12
焊条直径	1.6～3.2	2.5～4.0	3.2～5.0	5.0

焊接电流与焊条直径的关系如下：

$$I=Kd \tag{4-4}$$

式中　I——焊接电流，A；

K——经验系数，A/mm，见表 4-11；

d——焊条直径，mm。

表 4-11　焊接电流选用的经验系数

焊条直径 d/mm	1.6	2～2.5	3.2	4～5
经验系数 K/(A/mm)	15～25	20～30	25～35	30～40

b. 施焊现场判断焊接电流是否合适的方法。判断所选择的焊接电流是否合适可根据下述几点来判定。

ⅰ. 看飞溅。焊接电流过大时，电弧吹力大，可看到较大颗粒的铁水向熔池外飞溅，焊接时爆裂声大；电流过小时，电弧吹力小，熔渣和铁水不宜分清。

ⅱ. 看焊缝成形。焊接电流过大时，熔深大、焊缝余高低、易产生咬边；焊接电流过小时，熔深浅、焊缝窄、焊缝余高过高，且两侧与母材金属熔合不好；电流适中时，焊缝两侧与母材金属熔合得很好，呈圆滑过渡。

ⅲ. 看焊条熔化状况。焊接电流过大时，当焊条熔化了大半根时，其余部分均已发红；电流过小时，电弧燃烧不稳定，焊条易粘在焊件上。

② 电弧电压。电弧两端（两电极）之间的电压，称为电弧电压，包括阴极压降、阳极压降和弧柱压降。

不锈钢平焊时，为了避免基本金属过热和最可靠地保护焊接熔池，为防止合金元素烧损，要进行短弧（因电弧电压与电弧长度基本成正比，所以电弧越短电弧电压就越低）快速焊。

所谓短弧一般认为是电弧长度为焊条直径的 0.5～1.0 倍，一般情况下短弧焊接的电弧长度为 2～3mm。

电弧过长（电弧电压过高）会出现下列现象。

a. 电弧燃烧不稳定，电弧漂动，飞溅多。

b. 熔深小，容易产生咬边、未焊透、焊缝表面高低不平整、焊波不均匀等。

c. 对熔化的金属保护差，空气中氧、氮等有害气体侵入，使焊缝产生气孔的可能性增加，使焊缝金属的力学性能降低。

③ 电源种类与电极极性。根据所选用焊条药皮的类型来确定焊接电源的种类和电极极性，焊条药皮的类型有碱性、钛型和钛钙型 3 种。焊条牌号 A×××的最后一个“×”为“7”或焊条型号 E×××-××的“-××”为“-15”和“-25”为碱性焊条，要选用直流电源反极性施焊；焊条牌号 A×××的最后一个“×”为“2”或焊条型号 E×××-××的“-××”为“-16”“-17”和“-26”为钛型或钛钙型焊条，通常选用直流电源反极性进行施焊，也可以选用交流电源进行焊接。采用直流反极性电源施焊，有电弧稳定、焊接速度快的优点。板薄或拘束度较小时，焊条可选用氧化钛钙型焊条。重要的产品及拘束度较大或进行全位置焊接宜选用低氢型药皮焊条。

注：交流电源的代号为 AC，直流反接的代号为 DC＋或 DCRP，DCRP 是英文 direct current reversed polarity 的缩写。

④ 焊接速度。单位时间内完成的焊缝长度，称为焊接速度。为控制焊接线能量（单位长度内焊缝的热输入量），防止晶间腐蚀，焊接速度必须给予控制，在保证焊透的前提下快速焊接，因焊条电弧焊为间断焊接，对于焊条电弧焊的焊接速度可用每根焊条完成的焊缝长度来考核。

⑤ 焊缝宽度（weld width）。焊缝表面两焊趾之间的距离，称为焊缝宽度。为了减少焊接熔池热量，提高焊缝金属耐腐蚀性能。焊接时不允许焊条横向摆动，而采用窄焊道技术，以加快冷却速度，焊缝宽度一般不超过焊条直径的 2 倍，多层焊时每层焊道厚度不超过 3mm。对于 18-8 型奥氏体不锈钢进行双面或多层焊时，第一道焊缝由于母材金属熔化较多，可能得不到双相组织，因此要求焊道窄一些，焊条不做横向摆动。

⑥ 道间温度（interpass temperature）（俗称层间温度）。多层焊时，在施焊后继焊道之前，其相邻焊道应保持的温度，称为道间温度。

焊道（bead）：每一次熔敷所形成的一条单道焊缝。

焊层（layer）：多层焊时的每一个分层。每个焊层可由一条焊道或几条并排相搭的焊道所组成。

为了防止晶间腐蚀和产生 σ 脆化相，焊接时要控制道间温度不高于 150℃，生产中为了确保道间温度不超过 150℃，在每焊完一层焊缝后浇洁净的水来加快接头的冷却速度。如果条件允许，可以在焊缝背面浇水；也可以边焊边浇水，焊一段浇一段水，但必须注意焊接熔池及其附近区域不允许有水。

（4）化工容器和设备的焊接顺序

① 与腐蚀介质接触的焊缝，应该最后施焊。

② 先单件，后组件或部件，最后总装焊。单件焊接时先焊接纵缝，后焊接环缝，以减少焊接应力。尽量减少容器内部焊接工作量。

③ 在焊接操作时，应尽量采用对称焊、分段焊、跳焊和逆向分段焊等操作方法，如图 4-10 所示，以减少焊接应力及焊后变形量。

（5）单面焊背面成形焊接技术[5]

化工容器和管路的对接焊缝须保证完全焊透，但在焊接直径小或无法实现双面焊时，对接焊缝须采用单面焊背面成形的方法来保证焊缝背面焊透。单面焊时易造成内表面未焊透或出现焊瘤和咬边等焊接缺欠，影响接头的焊接质量。为此，提出了单面焊背面成形的焊接操作方法。

单面焊背面成形操作方法是一种高技巧的操作技术，要求在焊件坡口背面没有任何辅助

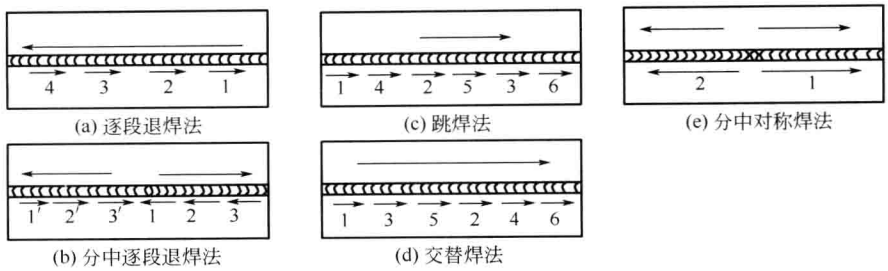


图 4-10　焊条电弧焊焊接方法

措施的条件下，在坡口正面进行焊接，且焊后保证坡口正面、背面都有一定的焊缝余高，且焊缝均匀整齐、成形良好。

① 接头形式。适用于焊条电弧焊单面焊背面成形的接头形式，主要有板状对接接头（对接焊缝）、管状对接接头（对接焊缝）和插入式管与壳体接头（对接焊缝加角焊缝）、骑座式管与壳体接头（对接焊缝加角焊缝）。

② 焊接位置。按焊接接头所处位置，可选择平焊、立焊、横焊和仰焊等位置进行施焊。这种单面焊背面成形的焊接操作方法一般适用于 V 形坡口且钝边较小的对接焊缝。

③ 电弧燃烧方式。焊条电弧焊单面焊背面成形的焊缝，可通过间断灭弧焊方式（又称断弧焊法，或称闪弧焊法）或连弧焊方式来实现。

a. 间断灭弧焊方式是在焊接过程中，利用电弧的短时反复点燃和熄灭来控制焊缝成形，即电弧燃烧时加热熔透坡口根部，形成熔合良好的熔池；电弧熄灭时，将熔池结晶形成双面焊缝（背面自由成形）。断弧焊的焊接参数见表 4-12。

表 4-12　断弧焊的焊接参数[5]

焊件种类与焊接位置	钢材规格/mm	坡口间隙/mm	钝边/mm	坡口角度/(°)	焊条直径/mm	焊接电流/A
管水平固定	ϕ150×6	2.8～3.2	0.8～1.2	60±2	3.2	80～85
管垂直固定	ϕ150×6	2.8～3.2	0.8～1.2	60±2	3.2	90～100
管板水平固定	ϕ60×5/10	2.8～3.5	0.5～1	55±2	2.5	55～65
管板垂直固定	ϕ60×5/10	2.8～3.5	0.5～1	55±2	2.5	55～65

b. 连弧焊方式是电弧在整个焊接过程中连续燃烧，不熄弧，其运条操作方法又有挑弧法和稳定电弧焊法之分。稳弧法也可借助电流调节器，引弧时把电流调得稍大些，便于引弧段焊透，电弧引燃后再调至正常，转为正常焊接，收尾时再将焊接电流调小些，有些弧焊整流器已增添了此功能。挑弧法是指焊条在坡口两侧摆动，当形成熔池时，电弧离开熔池到坡口边缘，待熔池凝固的瞬间，停在坡口边缘的电弧迅速移至熔池处，重新进行焊接。连弧焊的焊接参数见表 4-13。

表 4-13　连弧焊的焊接参数[5]

焊件种类与焊接位置	钢材规格/mm	坡口间隙/mm	钝边/mm	坡口角度/(°)	焊条直径/mm	焊接电流/A
管水平固定	ϕ133×10	2.5～3.2	1～1.5	70±2	2.5	55～65
管垂直固定	ϕ133×10	2.5～3.2	1～1.5	65±2	2.5	55～65

（6）焊接质量控制

① 多层焊。

a. 按照不同的板厚和不同的坡口形式，为填满坡口并保证焊接接头质量可采用多层焊或多层多道焊，详见图 4-11。对于薄板和中厚板可采用单层或多层焊；在横焊位置进行厚板或坡口较宽时焊接，应用多层多道焊。

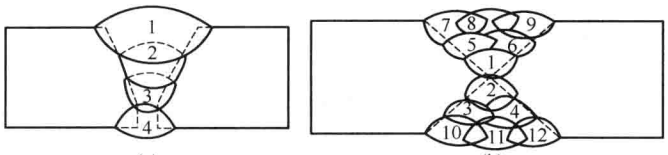


图 4-11 多层焊和多层多道焊

b. 多层焊时应防止每层焊缝金属过厚，多层焊每层焊道厚度不超过 3mm，以减少热输入并有利于气体析出，同时还有利于提高焊缝金属耐腐蚀能力。焊接层数可按公式(4-5) 计算，各层焊缝接头应相互错开，错开距离一般不小于 50mm。除覆盖层焊条可轻微做横向摆动外，一般不宜做横向摆动。当然，覆盖层也可以用多道焊来完成。

计算焊接层数经验公式如下：

$$n=\frac{\delta}{md} \tag{4-5}$$

式中 n——焊接层数；

δ——焊件厚度，mm；

m——经验系数，一般取 $m=0.8\sim1.2$；

d——焊条直径，mm。

c. 在施焊时应防止焊道间形成沟槽，层间焊渣应及时清理干净。

d. 多层焊时，每层焊缝应连续焊完，道间温度不超过 150℃。

② 质量检验。质量检验的目的是控制各种焊接缺欠或缺欠。单面对接焊时，应保证根部焊透。双面焊时正面焊完，在焊背面焊缝之前须将正面焊缝根部的焊瘤、熔渣和未焊透、未熔合等缺欠彻底铲净，才能施焊。每层（道）焊缝冷却须及时彻底地清理焊渣、飞溅等。

4.2 埋弧焊

电弧在焊剂层下燃烧进行焊接的方法称为埋弧焊（submerged arc welding，SAW）。焊接电弧在焊丝与焊件之间燃烧，焊丝沿着待焊轨迹均匀不断地送往电弧区，电弧热将焊丝端部及电弧附近的母材金属和焊剂熔化，电弧移开后熔池金属凝固成焊缝，熔化的焊剂（未渗入焊缝金属中的那部分）则凝固成渣壳覆盖于焊缝表面。埋弧焊分机械操作（自动）和手工操作（半自动）两种方法。

4.2.1 焊接设备

埋弧焊设备按送丝机构可分为等速送丝和均匀调节送丝两大类。

(1) 等速送丝（又称电弧自身调节送丝）

等速送丝适用于细焊丝或高电流密度的焊接场合，配合管状导电嘴（或称管状偏心导电嘴、偏心导电嘴）。焊丝的送进按预选定的速度等速进入焊接区，其工作原理是采用机械方法（更换变速齿轮）来调速。依靠电弧的自身调节作用来维持弧长相对稳定。当焊接电弧受

到外界干扰而弧长增加时，下降外特性电源供给的焊接电流减小，焊丝熔化速度减缓，电弧便会由长变短，趋向给定值。反之，电弧变短时，焊接电流增大，焊丝熔化加快，弧长又由短变长，趋向给定值。按这个工作原理制造的等速送丝埋弧焊设备有 MZ1-1000、MZ2-1500 和 MZ3-500 等型号，其焊接电源可采用交流、直流弧焊电源。

（2）均匀调节送丝（又称强迫调节送丝、变速送丝）

均匀调节送丝适用于粗焊丝或低电流密度的焊接场合，配合滚轮式或夹瓦式导电嘴。

焊丝的送进速度按电弧电压的高低自动均匀调节，电弧电压调节原理是利用电弧电压作为反馈信号，经过控制调节系统改变送丝速度而保持弧长相对不变。当电弧受外界干扰变长，电弧电压升高时，控制调节系统接到电压反馈信号后送丝速度调快，弧长由长变短，趋向稳定值。当电弧长度变短，电弧电压下降时，将送丝速度调慢，弧长增长趋向给定值。这种埋弧焊机的控制系统稍复杂，具体型号有 MZ-1000、MZ-1-1000 和 MU1-1000 等。其焊接电源可采用交流、直流弧焊电源。

按工作需要，埋弧焊机常见的构造形式有：焊车式、悬挂式、机床式、门架式和悬臂式等，如图 4-12 所示。

4.2.2　辅助设备

埋弧焊时为了调整焊接机头与焊件的相对位置，使整个焊接过程中待焊处始终处于最适合焊接的位置，还要保证在施焊过程中稳定、可靠安全，一般均需有相应的辅助设备与焊机相配合。辅助设备有焊接夹具、焊件变位设备、焊机机头变位设备、焊缝成形设备和导电嘴等。

（1）焊接夹具

其目的在于使焊件准确定位并夹紧，以便焊接。这样可以减少或免去定位焊缝且能减少焊接变形。图 4-13 为一种常用的筒形工件纵焊缝的琴键夹具的示意图，配有成形铜垫板，能获得单面焊双面成形的焊缝。

（2）焊件变位设备

主要功能是使焊件旋转、倾斜、翻转　以使待焊处处于最适合焊接的位置，来达到提高生产效率，保证焊缝质量和减轻工人劳动强度的目的。焊件变位设备的形式、结构和尺寸要根据焊接构件的形式、重量专门设计。通常有滚轮架和翻转机等。用于回转体的典型滚轮架如图 4-14 所示。长轴式焊接滚轮架的主动滚轮与从动滚轮的数量较多时，要求滚轮始终保持在同一轴线上，焊件在上面不易变形和打滑。这种滚轮架适用于焊接中、薄壁、长度大的筒形焊件。筒体上如有凸出附件，应防止转动中与长轴相互干涉。

（3）焊机机头变位设备

这种设备又称焊接操作机。它能将焊接机头对准待焊位置，使之在该位置上操作，或者以一定速度沿规定轨迹移动焊机机头进行焊接。它与焊接滚轮架（滚轮架的结构形式、选用，见 JB/T 9187—1999《焊接滚轮架》）等配合使用，能完成各种构件的焊接。其基本形式有平台式、悬臂式、伸缩式、龙门式等几种。常用的平台焊接操作机与滚轮架配合使用情况，如图 4-14、图 4-15 所示。

（4）焊缝成形设备

由于埋弧焊的电弧功率较大，在对接接头焊接时，为了防止熔化金属的流失和烧穿并促使焊缝背面成形，往往需要在焊缝背面加垫板。最常用的焊缝成形设备除前面所述的铜垫板外，还有焊剂衬垫。它适用于纵焊缝和环焊缝。图 4-16 为典型的带式环焊缝焊剂垫的示意图。图中举升气缸 6 在工作时将带支撑总成 1 举起，使带两边凸棱与工作表面接触，带在摩擦力的作用下随焊件运动。位于带一端的焊剂斗 3 内的焊剂经出料口落在带上，传到待焊点

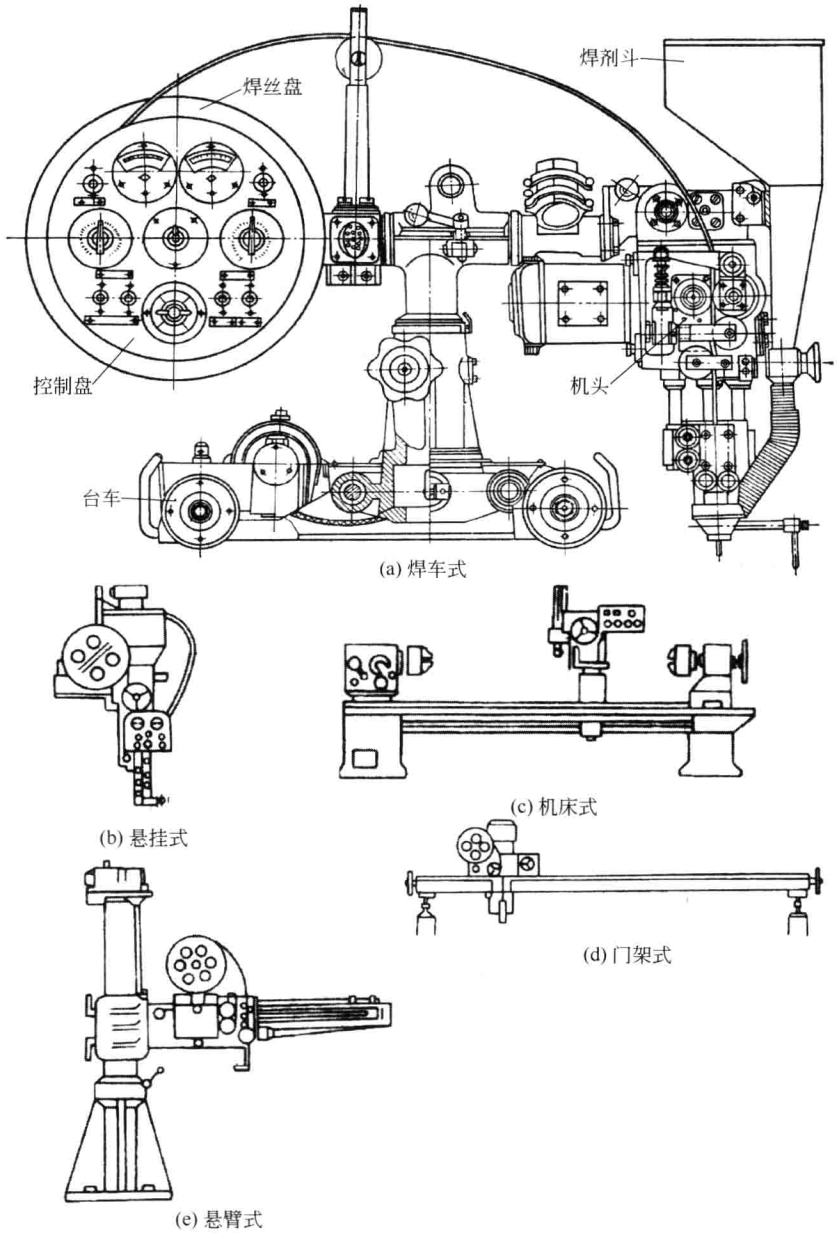


图 4-12 常见的埋弧焊机形式

的下方，托住高温的熔池，过后将多余焊剂传到另一端，落入回收箱内，供重复使用（需筛除碎粉、渣壳等，并重新烘干）。

（5）导电嘴

导电嘴按结构分为管式导电嘴（或称管状偏心导电嘴、偏心导电嘴）、滚轮式（或称滚动式导电嘴）、夹闸瓦式导电嘴（或瓦片式导电嘴）。ϕ4.0mm 以下的细焊丝常用管式导电嘴；ϕ4.0mm 以上的焊丝宜用滚轮式或夹瓦式导电嘴。导电嘴的结构见图 4-17。

4.2.3 焊前准备

（1）编制焊接工艺文件

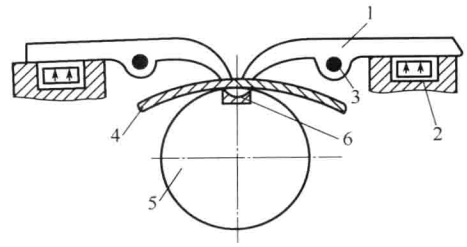


图 4-13　气动夹具示意图

1—琴键压块；2—气囊；3—轴；4—焊件；5—心轴；6—垫板

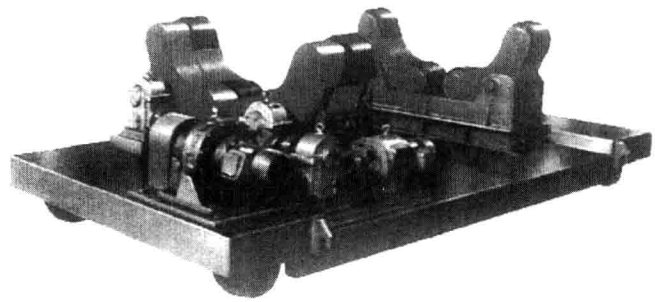


图 4-14　滚轮架

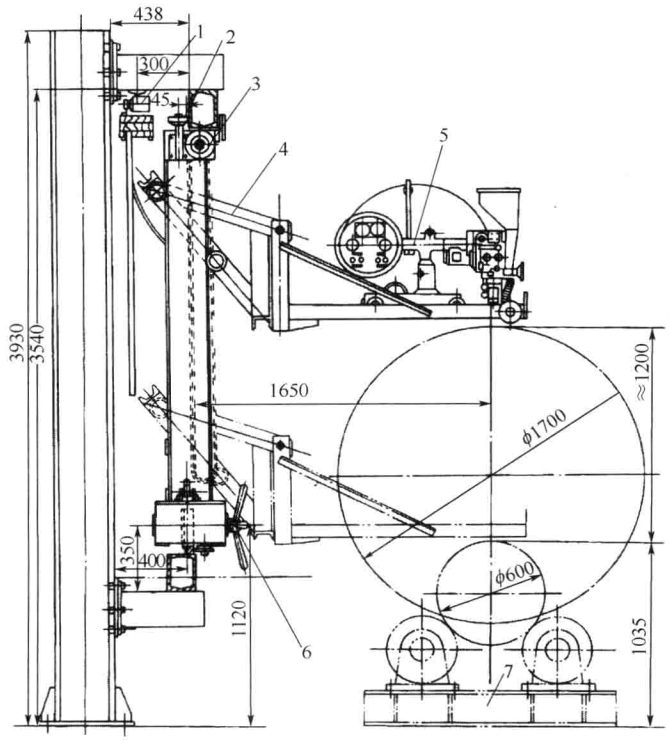


图 4-15　焊接操作机平台式

1—电缆小车；2—走架；3—平台升降机构；4—升降平台；5—机头；6—走架行走机构；7—滚轮架

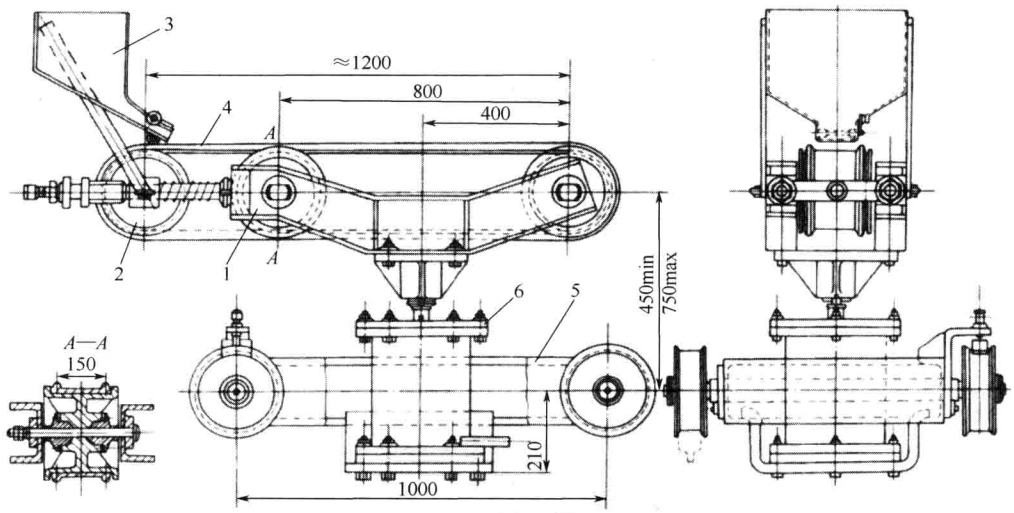
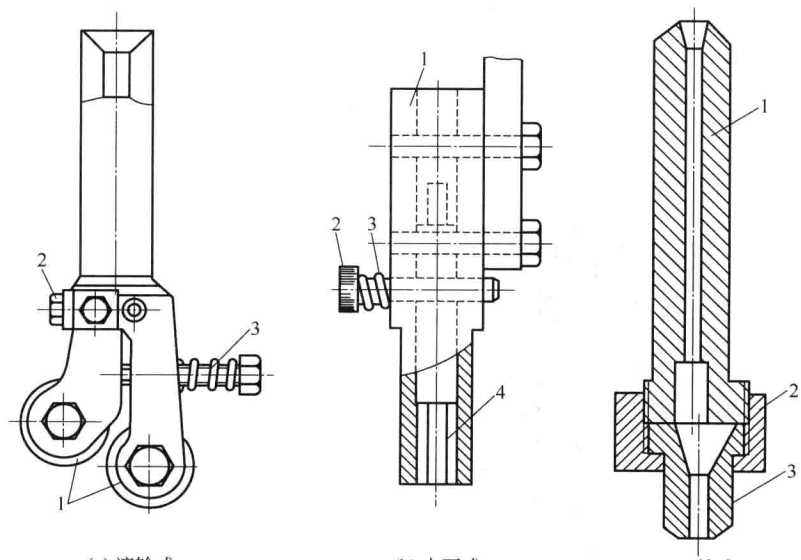


图 4-16 带式环焊缝焊剂垫

1—带支撑总成；2—张紧装置；3—焊剂斗；4—V 带；5—行走台车；6—举升气缸



(a) 滚轮式
1—导电轮；2—旋紧螺钉；3—弹簧

(b) 夹瓦式
1—接触夹瓦；2—旋紧螺钉；3—弹簧；4—可换衬瓦

(c) 管式
1—导电杆；2—螺母；3—导电嘴

图 4-17 导电嘴的结构

焊接工艺文件种类较多，一般情况下，各个企业应根据每个产品的实际情况编制完整的《焊接作业指导书》（早期也称《焊接工艺规程》）。一般《焊接作业指导书》应包括以下内容。

① 定位焊的焊接方法和定位焊的焊接材料。一般定位焊采用焊条电弧焊，焊接材料的选用见本章 4.1 节或第 2 章。

② 焊接返修方法和焊接返修用的焊接材料。局部焊接返修一般选用焊条电弧焊，整条焊缝焊接返修可采用埋弧焊，也可采用焊条电弧焊。焊接材料的选用见本章 4.1 节或第 2 章。

③ 焊接返修次数。锅炉、压力容器产品同一部位的焊接返修次数不宜超过两次，超过两次以上的返修须经制造单位技术负责人批准。与腐蚀介质接触的焊缝焊接返修后须保证原有的抗腐蚀性能。

④ 多层或多道焊时道间温度不得超过 150℃。

⑤ 施焊重要焊缝的焊工须持证上岗施焊。

⑥ 无损检测。根据设计图样要求或产品设计制造标准的要求，规定接头焊后无损检测方法（例如 X 射线检测）、检测比例和检测部位（例如某些低中压压力容器的 A、B 类焊缝允许进行局部射线检测，检测比例不低于 20%）、合格级别（例如不低于Ⅲ级为合格）。

⑦ 压力容器产品焊接试件。压力容器产品焊接试件制作须符合 TSG R0004—2009《固定式压力容器安全技术监察规程》、GB 150.4—2011《压力容器第 4 部分：制造、检验和验收》、NB/T 47015—2011（JB/T 4709）《压力容器焊接规程》、NB/T 47016—2011《承压设备产品焊接试件的力学性能检验》等文件的要求。

（2）焊接工艺评定

① 焊接工艺须在产品施焊之前评定合格，包括熔入正式焊缝内的定位焊缝、正式焊缝的焊接工艺和焊接接头返修的焊接工艺。用组合焊接方法评定合格的焊接工艺评定报告（例如，焊条电弧焊打底，埋弧焊盖面的组合焊接），须注意每种焊接方法适用的焊缝金属厚度范围及每种焊接方法的焊接参数适用范围。

② 晶间腐蚀焊接工艺评定。化工容器或与腐蚀介质接触的焊缝，其焊接工艺须在产品施焊之前晶间腐蚀评定合格。

（3）坡口的准备

埋弧焊的焊接坡口形式和尺寸执行 GB/T 985.2—2008《埋弧焊的推荐坡口》或本企业制定的相应焊接技术文件。

① 坡口加工要求。埋弧焊时，一般看不见焊接熔池，也看不到待焊轨迹，施焊过程操作稍有不当，即产生焊偏、焊瘤等缺陷；而且，通常自动焊的焊接速度设定后不做自适应调节，即填充金属熔入熔池的多少是基本固定不变的，不能适应坡口大小、间隙宽窄的波动；加之电流密度大、热量集中，收弧时弧坑较大，易产生弧坑裂纹。为此，对待焊件边缘（包括坡口）要求较高。

a. 待焊工件边缘要平整，要求导电嘴端面与待焊处要保持恒定距离，不能有过大的跳动。

b. 坡口和板边最好用刨边机加工（小件可在铣床或刨床上加工，不锈钢管的环向坡口可车床或坡口机加工），没有刨边机或其他机加设备的可用等离子弧切割机进行加工，但要保持切割面平整。当坡口处有残留渣迹和残余变形时，一定要用砂轮打磨平滑和矫正齐平。用机加工方法和等离子切割法加工的坡口，热影响区小，不会影响焊接接头抗腐蚀性能。

② 工件组对要求。对接接头待焊处坡口间隙和坡口钝边要均匀一致，否则焊接时易产生烧穿、未焊透、未熔合或者焊缝成形不良等缺陷。

（4）引弧板和收弧板。施焊以前要配备引弧板和收弧板，纵焊缝引弧板的厚度和化学成分要与待焊材料一致，板的长度不小于 150mm，宽度不小于 50mm，引弧板和收弧板与待焊件之间要平齐，不允许留有间隙。焊接环焊缝不能用引弧板和收弧板时，只好在待焊处引弧，焊过一段距离后，要将引弧处进行修整；收弧时，仍在焊缝上收弧，但必须修磨收弧焊缝，不允许有弧坑裂纹和弧坑凹陷。

（5）施焊环境。焊条电弧焊时焊接场地风速不大于 10mm/s；相对湿度不大于 90%；要避免风、雨、雪的直接影响；环境温度不得低于 0℃，否则应在始焊处 100mm 范围内预热到 15℃左右。焊接厂房应安装通风设备，减少有害气体和烟尘对环境的污染。

4.2.4 埋弧焊工艺

(1) 焊接参数

埋弧焊的焊接参数比焊条电弧焊多一些，包括焊接电流、电弧电压、焊接速度、焊接材料、焊丝直径、焊丝偏移量、焊丝干伸长度、焊丝输送速度等。

① 焊接电流。焊接电流的大小直接影响焊接熔池的深浅，焊接电流大，热输入大、电弧挺度大，焊接熔池深；反之则浅。当焊接电流较大时，由于熔深较深，而焊缝宽度变化不大，所得到的焊缝成形系数（焊缝的宽度与焊缝有效厚度的比值称为焊缝成形系数）较小。这样的焊缝，对熔池中气体和夹渣物的上浮和溢出十分不利，易产生气孔、夹渣和热裂纹。所以一般增加电流时，必须相应的提高电弧电压，以保证得到合理的焊缝形状，一般焊缝成形系数控制在 1.3～2.0 之间，这样对熔池中的气体溢出以及防止产生夹渣或热裂纹等缺陷有利。

② 电弧电压。电弧电压随着电弧长度的变化而变化，电弧拉长了，电弧电压则升高，电弧挺度下降，母材受热面增加，所以焊接熔池的深度减小，焊缝宽度明显增宽。适当的增加电弧电压，会提高焊缝质量，但应与增加焊接电流相配合。单纯地增加电弧电压，会使熔深减小，造成焊件未焊透。而且焊剂的熔化量大，增加焊剂的消耗量。焊缝表面粗糙，脱渣困难，严重时，会造成焊缝边缘咬边。

③ 焊接速度。当焊接电流和电弧电压不变时，焊接速度提高，电弧给予焊接熔池中单位长度的热量势必减少，导致焊缝熔深和焊缝宽度减小。过分的增加焊接速度，会导致焊接电弧对工件的加热不足，造成焊件未焊透和边缘未熔合等缺陷。

④ 焊接材料。

a. 压力容器常用不锈钢埋弧焊焊丝、焊剂见表 4-14，常用奥氏体型耐热钢埋弧焊焊剂与焊丝见表 4-15，结构件常用奥氏体不锈钢埋弧焊焊剂与焊丝见表 4-16。

表 4-14 压力容器常用不锈钢埋弧焊用焊丝、焊剂[3]

钢号	焊剂型号	焊剂牌号及焊丝牌号
S30408 06Cr19Ni10	F308-H08Cr21Ni10	SJ601-H08Cr21Ni10 HJ260-H08Cr21Ni10
06Cr18Ni11Ti	F347-H08Cr20Ni10Nb	SJ641-H08Cr20Ni10Nb
06Cr17Ni12Mo2	F316-H06Cr19Ni12Mo2	SJ601-H06Cr19Ni12Mo2 HJ260-H06Cr19Ni12Mo2
06Cr17Ni12Mo2Ti	F316L-H03Cr19Ni12Mo2	SJ601-H03Cr19Ni12Mo2 HJ260-H03Cr19Ni12Mo2
06Cr19Ni13Mo3	F317-H08Cr19Ni14Mo3	SJ601-H08Cr19Ni14Mo3 HJ260-H08Cr19Ni14Mo3
022Cr19Ni10	F308L-H03Cr21Ni10	SJ601-H03Cr21Ni10 HJ260-H03Cr21Ni10
022Cr17Ni12Mo2	F316L-H03Cr19Ni12Mo2	SJ601-H03Cr19Ni12Mo2 HJ260-H03Cr19Ni12Mo2
06Cr19Ni13Mo3	F317-H08Cr19Ni14Mo3	SJ601-H08Cr19Ni14Mo3 HJ260-H08Cr19Ni14Mo3

表 4-15　常用奥氏体型耐热钢埋弧焊焊剂与焊丝[6]

钢号牌号	焊丝牌号	焊剂牌号
06Cr19Ni10(0Cr18Ni9)	H0Cr19Ni9、H0Cr21Ni10	SJ601 SJ605 SJ608 HJ260
1Cr18Ni9Ti	H1Cr19Ni10Nb、H0Cr21Ni10Ti	
0Cr18Ni11Ti、0Cr18Ni11Nb	H0Cr21Ni10Ti、H0Cr19Ni10Nb	
06Cr18Ni13Si4(0Cr18Ni13Si4)	H0Cr19Ni11Mo3	
16Cr20Ni14Si2(1Cr20Ni14Si2)	H1Cr25Ni13	
06Cr23Ni13(0Cr23Ni13)	H1Cr25Ni13	
06Cr25Ni20(0Cr25Ni20)	H1Cr25Ni20	
06Cr17Ni12Mo2(0Cr17Ni12Mo2)	H0Cr19Ni11Mo3	
06Cr19Ni13Mo3(0Cr19Ni13Mo3)	H0Cr25Ni13Mo3	

表 4-16　结构件常用奥氏体不锈钢埋弧焊焊剂与焊丝[6]

钢号牌号	焊丝牌号	焊剂牌号
00Cr18Ni10N	H00Cr21Ni10	SJ601 SJ608 SJ701
06Cr19Ni10(0Cr18Ni9)、12Cr18Ni9(1Cr18Ni9)	H0Cr21Ni10i	
1Cr18Ni9Ti、0Cr18Ni11Ti	H0Cr21Ni10Ti、H0Cr19Ni10Nb	HJ107 HJ151 HJ172
1Cr18Ni12Mo2Ti	H0Cr19Ni12Mo2	
0Cr18Ni12Mo2Ti	H00Cr19Ni12Mo2	
00Cr17Ni14Mo2	H00Cr18Ni14Mo2	HJ107 HJ151 HJ172
0Cr18Ni14MoCu2	H0Cr19Ni12Mo2Cu2	

b. 常用不锈钢埋弧焊用焊剂烘焙要求见表 4-17。

表 4-17　常用不锈钢埋弧焊用焊剂烘焙温度、烘焙时间

焊剂牌号	焊剂类型		烘焙温度/℃	烘焙时间/h
	按生产工艺分类	按化学成分分类		
HJ151	熔炼型焊剂	无锰中硅中氟	250～300	2
HJ151Nb		无锰中硅中氟	250～300	2
HJ107		无锰中硅中氟	300～350	2
HJ172		低锰中硅中氟	350～400	2
HJ260		低锰中硅中氟	300～400	2
“772 焊剂”		无锰无硅高氟	300～400	2
SJ601	烧结型焊剂	碱性焊剂	300～350	2
SJ605		碱性焊剂	350～400	2
SJ608		碱性焊剂	300～350	2
SJ701		钛碱性焊剂	300～400	2

注：“772 焊剂”为宝鸡钢管厂焊剂分厂按其企业标准生产的焊剂。

c. 焊剂颗粒度。熔炼焊剂颗粒度为 2.5～0.45mm（4～40 目），烧结焊剂颗粒度为 2～0.28mm（10～60 目），焊剂允许重复使用，但重复使用前须筛出细粉和渣壳，并与新焊剂

混匀后使用。

⑤ 焊丝直径。焊丝直径加粗，电弧范围扩大，使熔宽增加；如果焊接电流保持不变，电流密度减小，电弧挺度下降，则熔深将相应地减小。

⑥ 焊丝偏移量 a。焊接环焊缝时，焊丝不应在最高点或最低点，而应在下坡焊的位置上，如图 4-19 所示。焊丝偏移量直接影响焊缝成形，见图 4-18。焊丝偏移量与焊件外径和焊接线能量有关。当焊接线能量大时，熔池停留时间较长，所以焊丝偏移量可选较大值。当焊接线能量小时，熔池停留时间较短，所以焊丝偏移量选取较小值。当焊件外径较大时，熔池中的液态金属外溢的倾向较小，此时，焊丝偏移量可取较大值。焊丝直径小于 3mm 时，焊丝偏移量一般不超过 5～10mm，焊丝直径大于 3mm 时，焊丝偏移量见表 4-18。

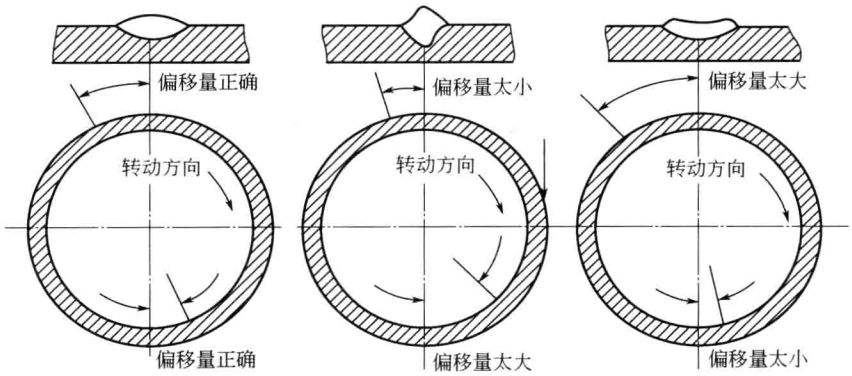


图 4-18 焊丝偏移量与焊缝成形关系示意图

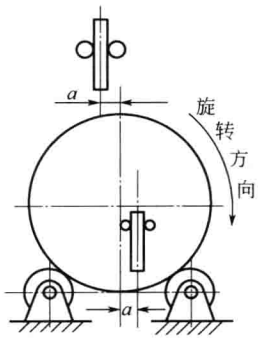


图 4-19 焊丝偏移量示意图

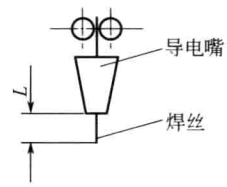


图 4-20 焊丝干伸长度示意图

表 4-18 焊丝偏移量选用 mm

筒体直径	焊丝偏移量
800～1000	20～25
＜1500	30
＜2000	35
＜3000	40

⑦ 焊丝干伸长度 L。焊丝前端到导电嘴前端的距离称为焊丝干伸长度，见图 4-20。焊丝干伸长度 L 增加，焊丝的预热温度增加，焊丝熔化速度增加，增加焊丝干伸长度可提高生产效率，但焊丝干伸长度超过 50mm 后会出现成段爆裂现象。所以焊丝干伸长度一般控

刘政军　徐德昆　等编著

不锈钢焊接及质量控制

The Second Edition
第二版

BUXIUGANG HANJIE
JI ZHILIANG KONGZHI

化学工业出版社

续表

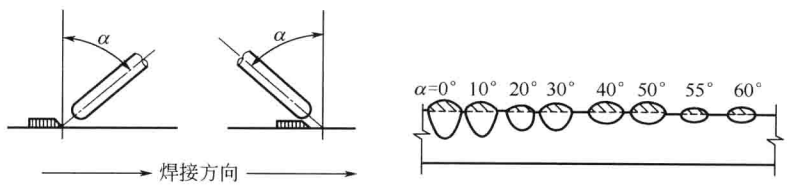
焊件厚度/mm	坡口形式	焊丝直径/mm	焊接面	焊接电流/A	电弧电压/V	焊接速度/(m/h)
20	X	4.0	正面	550～600	34～36	20～24
			背面	550～600	34～36	20～24
32	X	4.0	正面	550～600	34～38	18～24
			背面	550～600	34～38	18～24
40	U	4.0	正面	480～520	36～38	26～30
			背面	550～600	36～38	25～26

（2）定位焊

定位焊一般采用焊条电弧焊，焊接设备，焊接材料，焊接参数，焊接要求等见本章 4.1 节“焊条电弧焊”。

（3）操作因素

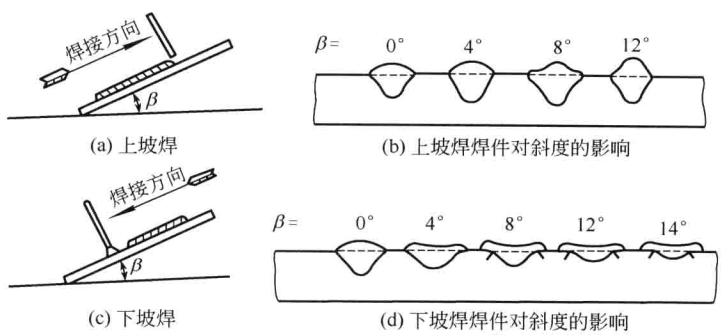
① 焊丝倾斜方向的影响。焊丝倾斜方向分为前倾和后倾两种，如图 4-21 所示。焊丝倾角的大小不同，电弧对熔池的力和热作用也就不同，从而影响到焊缝成形。当焊丝以一定倾角向后倾时，电弧力对熔池金属的后缘作用减弱，熔池底部的金属受热减少，故熔深变浅，如图 4-21(c) 所示。后倾角愈大，熔深愈浅，而熔宽增宽。相反，当焊丝做适当前倾时，可少许增加熔深。焊丝前倾斜通常较少采用，只有在特定情况下使用，如焊接小直径圆筒形焊件的环焊缝时采用这种方法。



(a) 前倾　(b) 后倾　(c) 焊丝后倾角度的影响

图 4-21　焊丝倾角对焊缝成形的影响

② 焊缝倾角（inclination of weld axis，焊缝轴线与水平面之间的夹角）对焊缝成形的影响。焊件在倾斜位置焊接时，有上坡焊和下坡焊之分，如图 4-22 所示。上坡焊、下坡焊



(a) 上坡焊　(b) 上坡焊焊件对斜度的影响

(c) 下坡焊　(d) 下坡焊焊件对斜度的影响

图 4-22　焊缝倾角对焊缝成形的影响

β—焊缝倾角

对焊缝成形的影响明显地不同。上坡焊时，焊缝余高过高，两侧易出现咬边，焊缝表面成形明显恶化，实际工作中应避免采用上坡焊。下坡焊与上坡焊相反，焊缝的熔深和余高均有所减小，而焊缝宽度略有增加，焊缝成形得到改善。在焊接圆筒焊件的内、外环焊缝时，一般均采用下坡焊，以减少发生烧穿的现象，并改善焊缝成形。但焊件下坡焊的角度过大时，熔深减小可能产生未焊透焊接缺陷。

(4) 施焊工艺与程序

埋弧焊焊接奥氏体型不锈钢的施焊工艺、程序基本与焊接碳钢相同，大致有以下几种。

① 焊条电弧焊与埋弧焊组合施焊。先用焊条电弧焊打底焊 (backing welding)，要求焊条电弧焊的熔深达到板厚的 1/3，焊完以后，清理焊缝。清除掉焊缝缺陷后，在另一方面进行埋弧焊，如图 4-23 所示。

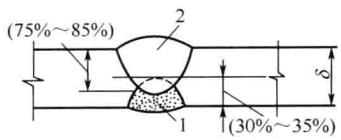


图 4-23　焊条电弧焊打底埋弧盖面

1—焊条电弧焊打底焊缝；2—埋弧焊接的焊缝

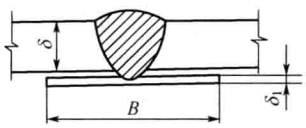


图 4-24　加永久垫板焊接

② 永久垫板埋弧焊。焊件装配时将同种钢材的垫板紧密地贴在接头下部用定位焊固定，进行单面熔透焊的一种埋弧焊工艺。此时要求垫板与焊件之间的间隙不得超过 0.5～1.0mm，否则液态金属或熔渣必然从间隙处流出或嵌入夹缝中间而造成焊接缺陷。焊接完毕，垫板有一部分金属被熔入焊缝形成焊缝金属，与焊件牢固地焊在一起。故要求垫板的化学成分、力学性能和耐腐蚀性能与焊件相同。永久垫板的尺寸见表 4-21。永久垫板焊接时的装配示意图如图 4-24 所示。焊接压力容器封头与筒体的环焊缝时，如果容器内部无法施焊，且不会引起缝隙腐蚀时，可用永久垫板焊接工艺。

表 4-21　永久垫板的尺寸　　mm

焊件厚度 δ	垫板厚度 δ_1	垫板宽度 B
2～6	4	30
6～10	6	40

③ 纯铜垫埋弧焊。这种焊接方法能使焊接构件达到单面焊背面成形的目的。纯铜垫靠焊接夹具紧贴待焊接头下面，它与焊件之间的间隙不允许大于 0.5mm，各种形式的纯铜垫结构如图 4-25 所示，纯铜垫板的形状和尺寸见图 4-26 和表 4-22。在纯铜垫接触焊件的一面开槽，槽的中心要与坡口根间隙对准，如果在槽内放焊剂 [见图 4-25(b)]，则槽的宽度和深度都要相应地加宽加深。

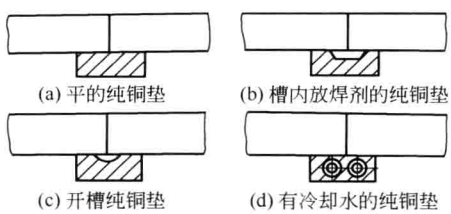


图 4-25　各种形式的纯铜垫结构

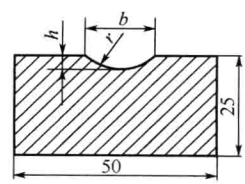


图 4-26　纯铜垫板的形状和尺寸

表 4-22 纯铜垫板断面尺寸 mm

焊件厚度	槽宽 b	槽深 h	沟槽曲率半径 r
4～6	10	2.5	7.0
6～8	12	3.0	7.5
8～10	14	3.5	9.5
12～14	18	4.0	12

④ 锁底对接接头埋弧焊。这种焊接方法适用于厚度大于 10mm 的构件，常用在小直径厚壁圆筒形焊件的环缝焊接，效果很好。锁底对接接头见图 4-27。

⑤ 焊剂垫埋弧焊。这种焊接方法也可使焊件达到单面焊背面成形的目的。根据焊件厚度，在接缝下面垫上一层厚度为 30～100mm 的焊剂，焊剂下面是一层绝缘的陶毡垫，陶毡垫下面是封闭的橡胶管，如图 4-28 所示。坡口根部与焊剂垫中心要对中，当橡胶管一端通入压缩空气时，焊剂被均匀地向上顶紧坡口的根部。焊接时，电弧将熔透焊件并熔化一些焊剂，形成单面焊双面成形的焊缝。假若焊剂向上顶的压力过大或过小，在焊缝背面会形成凹槽或突起部分，严重者焊缝不能成形，焊剂压力对焊缝成形的影响见图 4-29。

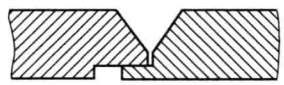


图 4-27 锁底对接接头

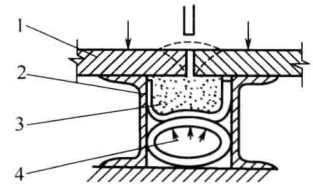
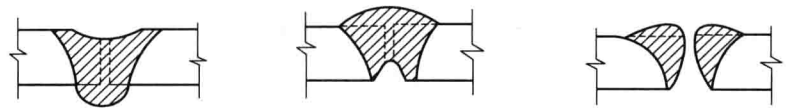


图 4-28 在焊剂垫上对接焊

1—焊件；2—陶毡垫；3—焊剂；4—橡胶管



(a) 焊剂垫压力不足的焊缝形状 (b) 焊剂垫压力过大的焊缝形状 (c) 焊剂垫压力太大的焊缝形状

图 4-29 焊剂压力对焊缝成形的影响

⑥ 双面对接埋弧焊。这是埋弧焊焊接对接焊缝的一种基本方法，使用最广。大多数中、厚板焊接时均使用双面焊。这种焊接接头的几何连续性最好，承载后应力状态好，能适应工作负荷复杂和苛刻的工作条件。故对焊缝长度较长，分布规则的焊缝，应尽量采用这种施焊工艺方法。此时第一面施焊也不用任何形式衬垫，在无垫焊接时，对焊件边缘的准备和装配质量要求较高，希望坡口根部间隙为零，局部根部间隙不得超过 1.0mm，否则液体金属容易从间隙中流出而烧穿焊缝或形成焊瘤。为了有一定的熔深，同时又不至于焊穿，通常在第一面焊接时，要求熔深为钢板厚度的 60%～70%。如果被焊件较薄，在第一面焊接时，可以采取减小焊接电流，提高焊接速度或者焊丝向后倾斜等措施来避免烧穿。有关奥氏体型不锈钢中等厚度板材的无垫双面埋弧焊的焊接参数见表 4-23。

(5) 半自动埋弧焊工艺

这种焊接方法适用于一般机械操作埋弧焊焊接不到的场合。焊接速度及均匀程度完全由焊工手工操作控制。半自动埋弧焊进行间断角焊最理想。其焊接生产效率比焊条电弧焊可提高 5 倍，而且焊缝质量良好。半自动埋弧焊焊接奥氏体型不锈钢的角焊缝时，其焊接参数见

表 4-24。

表 4-23　用无垫双面焊埋弧焊接奥氏体型不锈钢的焊接参数[1]

板厚 /mm	焊丝直径 /mm	先焊侧焊接参数			后焊侧焊接参数		
		焊接电流 /A	电弧电压 /V	焊接速度 /(mm/min)	焊接电流 /A	电弧电压 /A	焊接速度 /(mm/min)
6	4	400	32～34	450	450	32	450
8	4	480～500	32～34	450	550～600	32～34	450

表 4-24　用于手工操作埋弧焊角焊缝的焊接参数[1]

焊脚尺寸 /mm	焊接层次 /次	焊丝直径 /mm	焊接电流种类	焊接电流 /A	电弧电压 /V	焊接速度 /(m/h)
3	1	1.6	直流反接	170～180	24～25	23～25
	1	2.0		240～260	28～30	40～50
4	1	1.6		210～230	26～28	25～27
	1	2.0		270～290	29～33	34～42
5	1	2.0		310～330	30～34	36～45
6	1	2.0		330～370	30～33	30～41
8	1	2.0		340～400	32～34	25～34
10	1	2.0		380～430	34～37	18～22

4.2.5　焊剂自动回收

焊剂自动回收器分分离式气流引射和混合式气流引射两种，后者的回收率高得多。

分离式气流引射的自动回收器，焊剂与引射工作气体是分开的，其优点是压缩空气中的水、油等杂质，不与焊剂混合在一起，因而不会弄脏、弄湿焊剂。

混合式气流引射的自动回收器，压缩空气中残留的水、油，要与焊剂相混合而进入回收室，不能保证焊剂干燥和无油，它将影响焊剂的质量，使焊剂不能直接使用。如果对压缩空气的质量进行严格的处理，比较干净地排除掉油和水，这种自动回收器可广泛使用。

4.3　气体保护焊

气体保护电弧焊简称气体保护焊（gas shielded arc welding，GSAW），它是用外加气体作为电弧介质并保护电弧和焊接区的电弧焊。根据电极熔化与否，分成熔化极气体保护焊和非熔化极气体保护焊两种。熔化极气体保护焊（gas metal arc welding，GMAW），焊丝既作为电极导电又是填充金属，在施焊过程中，焊丝熔入熔池形成焊缝金属。非熔化极气体保护焊（gas tungsten arc welding/tungsteninert gas welding，GTAW/TIG），用钨或活化钨作为电极，施焊过程中电极不熔化，添加填充焊丝或不加填充焊丝形成焊缝金属。气体保护焊的外加气体，按其化学活泼性不同，又分惰性气体（如 Ar、He 或 Ar＋He）保护焊和活性气体（如 CO_2、$Ar+O_2$、$Ar+H_2$）保护焊。通常焊接奥氏体型不锈钢以氩气保护焊为主。

4.3.1 钨极惰性气体保护电弧焊

钨极惰性气体保护电弧焊（tungsten inert gas welding，TIG），从属于GTAW中的非熔化极惰性气体保护焊，焊接时钨极只起导电作用，不作填充金属（不熔化），如图4-30所示。根据保护气体的不同，分为钨极氩弧焊和钨极氦弧焊。焊接时，惰性气体氩气或氦气（Ar或He）通过焊枪或其他装置加入焊接区（或待焊区），钨极与被焊工件之间通电产生电弧，电弧在惰性气体的气氛中燃烧。氩气或氦气（Ar或He）在焊接过程中与钨极、焊件、填充焊丝不发生任何化学、冶金作用。惰性气体保护焊的显著特点是电弧燃烧稳定，能有效地隔绝周围空气，使熔池、填充丝不被氧化和氮化，因而能获得高质量焊缝，且能进行全位置焊接。但钨极所通过的电流密度受到限制，若通过电流密度太大，钨极会烧损，使焊缝金属产生夹钨缺欠。由于钨极氩弧焊电弧能量密度低，也不能获得较大的熔深和较高的生产率。采用钨极氦弧焊时，使用与钨极氩弧焊同样的电流密度，钨极氦弧焊的电弧电压较高，电弧热功率高。氦气作为热能的载体，它的热传导能比氩气约大9倍。这样，就有大量的热能输送到焊接熔池中去，从而获得较大的熔深和得到较高的生产率。但是氦气来源较为困难，价格比氩气高20～30倍，同时氦气的密度比氩气小，要达到同样的保护效果，氦气的消耗量高出很多，所以氦弧焊成本很高。焊接薄的和中等厚度的奥氏体型不锈钢板一般极少采用，只有在焊接关键焊件时才使用氦弧焊。

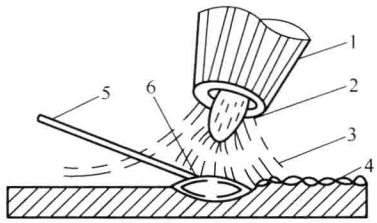


图4-30 钨极氩弧焊示意图
1—喷嘴；2—钨极；3—气体；4—焊缝；5—填充丝；6—熔池

（1）钨极氩弧焊的特点

钨极氩弧焊时，母材金属加热特点（主要指能量密度和热功率大小）介于气焊和焊条电弧焊之间，在很小的焊接电流（≤10A）下，电弧仍可稳定燃烧，特别适于焊接薄件或超薄件奥氏体型不锈钢的焊接构件。钨极氩弧焊时能清晰地观察到焊接熔池和熔透情况，因此，在要求保证焊透及要求背面成形的情况下，单面焊采用内壁（或背面）通氩气的钨极氩弧打底焊的方法，在国内外已得到普遍应用。钨极氩弧焊采用的填充丝为裸焊丝，在施焊过程中，不会产生飞溅，焊缝成形美观，焊缝上不存在渣壳，焊后不需清理。

钨极氩弧焊电弧的热功率低，焊接速度相对其他电弧焊而言比较小，由于奥氏体型不锈钢导热能力较差，如钨极氩弧焊的焊接速度很慢时，会导致焊接接头冷却速度缓慢，在400～800℃的危险温度区间停留时间较长，会影响焊接接头耐腐蚀能力（包括晶间腐蚀和均匀腐蚀）。

（2）钨极氩弧焊设备

① 钨极氩弧焊机。钨极氩弧焊的电源必须具有陡降或垂直陡降外特性，国内几种专用的钨极氩弧焊机的型号见表4-25。此外，焊接非重要件，可用焊条电弧焊的弧焊发电机或弧焊整流器作弧焊电源，配以专用焊枪，也可实现手工钨极氩弧焊。

专用焊机应具有下列功能：焊前提前1.5～4.0s输送保护气体，以驱赶输气管内和焊接区间的空气，防止产生气孔；焊后延迟5～15s停止输送保护气体，以保证尚未冷却的钨极和熔池能在保护气氛下冷却，防止氧化和产生气孔；自动接通和切断保护气源及引弧、稳弧的电路，防止接触引弧烧损钨极和接头产生夹钨缺陷；控制电源的通断；焊接结束前电流能自动衰减，以消除弧坑和防止弧坑开裂。

② 钨极氩弧焊焊枪（arc welding gun）。钨极氩弧焊焊枪由喷嘴、钨极夹持装置、导线、气水输送胶管、启动开关等零部件组成（结构详见图4-31）。根据适用的焊接电流大小，焊枪分水冷式和气冷式两类。常用水冷却式焊枪型号有QS-75°/400A、QS-75°/500A等，可匹配在大功率氩弧焊机上；气冷却式的焊枪型号有QQ-85°/100A、QQ-85°/200A等，可匹配在小功率氩弧焊机上。

表 4-25　常见国产钨极氩弧焊机主要技术参数[1]

项目	直流钨极氩弧焊				交直流两用钨极氩弧焊机			
	WS-63	WS-250	WS-400	WZ-500	WSE-150	WSE-250	WSE-400	WZE-500
输入电源	220V/50Hz	380V/50Hz	380V/50Hz	380V/50z	380V/50Hz	380V/50Hz	380V/50Hz	380V/50Hz
额定焊接电流/A	63	250	400	500	150	250	400	500
电流调节范围/A	4～63	25～250	60～400	25～500	15～150	直流 25～250 交流 40～250	50～400	50～500
工作电压/V		13～22	13～28	空载电压 70	16	直流 11～20 交流 11.6～20	12～28	15～40
额定负载持续率/%	60	60	60	60	35	60	60	60
电极直径/mm	1	1～4	1～4	3～5	1～3	1～4	1～4	2～7
焊丝直径/mm				0.8～1.2				不锈钢 0.8～2.5
焊接速度/(cm/min)				8.3～166				8.33～1333.33
送丝速度/(cm/min)				33.33～1666.66				20～1000

注：WS、WZ 分别为手工和机械操作（自动）直流钨极氩弧焊机；WSE、WZE 分别为手工和机械操作（自动）交、直流两用流钨极氩弧焊机。

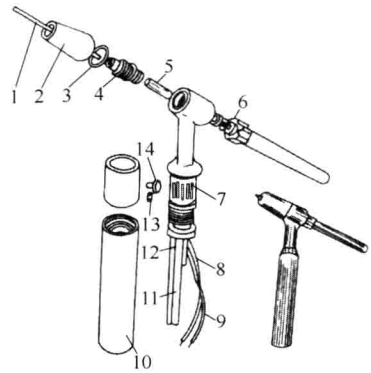


图 4-31 手工钨极氩弧焊焊枪

1—钨极；2—陶瓷喷嘴；3—O 形密封圈；4—导流件；5—电极卡；6—帽盖；7—接触片；8—出水管；9—焊接控制电缆线；10—尼龙把手；11—通水电缆连接；12—输气管；13—卡圈；14—按钮

③ 气体保护装置。气体保护装置有氩气瓶、减压器和流量计。氩气瓶是储存氩气的压力容器，使用时应注意安全规则。按 GB 7144—1999《气瓶颜色标志》的规定，氩气瓶应为银灰色，并标有“氩”（字的颜色为深绿色）字样。使用中应注意瓶内氩气不得用尽，应保留 0.5MPa 的余气，以防止空气混入而造成氩气不纯。减压器可用普通氧气减压器 QD-3A 和 QD-2A 代用。流量计是标定通入气体流量的装置，保证氩气在焊接过程中按给定的数量输送。常用的有 LZB 型玻璃转子流量计或医用流量计均可。但应注意流量计的示值受气体密度的影响。使用非氩气专用流量计时，表中的示值并非氩气的真实流量。现在已有氩气减压器和流量计结合一体的仪器，如 YQAR-195，以及 CO_2 减压器和流量计一体的 YQT-195。

（3）钨极氩弧焊操作要点[8]

① 引弧方法。引弧有两种方法，非接触引弧法（或称击穿引弧法）和接触引弧法。

a. 非接触引弧。非接触式引弧一般采用引弧器引弧。从原理上可分为高频高压引弧和高压脉冲引弧。高频高压引弧一般采用频率为 150～260kHz，电压为 2500～5000V 的交流电源；高压脉冲引弧采用 50～100 次/s，电压峰值为 5000～10000V 的直流电源。这种引弧方式是依靠高电压在钨极和工件表面产生强烈的电场，使两极间的气隙被击穿，产生电流通道而引燃电弧。专用 GTAW 电源均有高频高压或高压脉冲引弧和稳弧装置。焊接时钨极前端垂直工件，保持 3～5mm 距离，而后接通电源，在高频高压或高压脉冲作用下，击穿气隙放电，使保护气电离形成离子流而引燃电弧。非接触引弧钨极烧损很小，而且易引弧，因此应用广泛。

b. 接触引弧。接触引弧法多用于简易氩弧焊设备。但接触引弧法在接触瞬间会产生很大的短路电流，钨极端部容易烧损或容易造成母材电弧擦伤，但由于设备简单（不需要高压高频或高压脉冲引弧和稳弧装置），所以在焊接非重要件打底焊及薄板焊接中也有应用（随着钨极氩弧焊应用的普及，此种引弧方法已很少采用）。使用时钨极与引弧板接触引燃电弧，电弧引燃后，焊枪停留在引弧处不动（3～5s），当获得一定大小、明亮清晰和保护良好的熔池后，就可以添加焊丝，开始焊接过程。然后将电弧转向焊缝进行焊接。

② 控制熔池的形状和大小。控制熔池的形状和大小，关键是控制焊接温度，因为焊接温度对焊接质量的影响很大，各种焊接缺陷的产生是温度不合适造成的，例如：热裂纹、咬边、弧坑裂纹、凹陷、凸瘤、合金元素烧损等都是因为焊接温度过高产生的；冷裂纹、气孔、夹渣、未焊透、未熔合等焊接缺陷是因为焊接温度不够导致的。焊接热循环（welding cycle）中两个最重要的参数：一个是道间温度（含焊接起始温度）；另一个是线能量，都是控制焊接温度的。通常情况下，焊接电流与电弧电压调定的情况下，控制焊接速度是最方便的，当然有时也调整焊枪倾角。正常焊接时熔池的平面视图应该是鸭蛋圆形，短轴约为钨极直径的 2～2.5 倍，两侧母材熔入 1～1.5mm，电弧中心约在熔池的 1/3 处，也是温度最高处，焊丝即在此处添加。

③ 运弧要有规律。它与气焊有相似之处，但操作上要求更严格。焊枪（arc welding gun）、焊丝（welding wire）、焊件（weldment）间均有一定的位置关系，见图 4-32。焊枪轴线与已焊表面的夹角称为焊枪倾角，它直接影响热量输入、保护效果和操作视野，一般焊枪倾角为 70°～85°，焊枪倾角 90°时保护效果最好，但从焊枪中喷出的保护气流随着焊枪移

动速度的增加而向后偏离，可能使熔池得不到充分的保护，所以焊速不能太快。

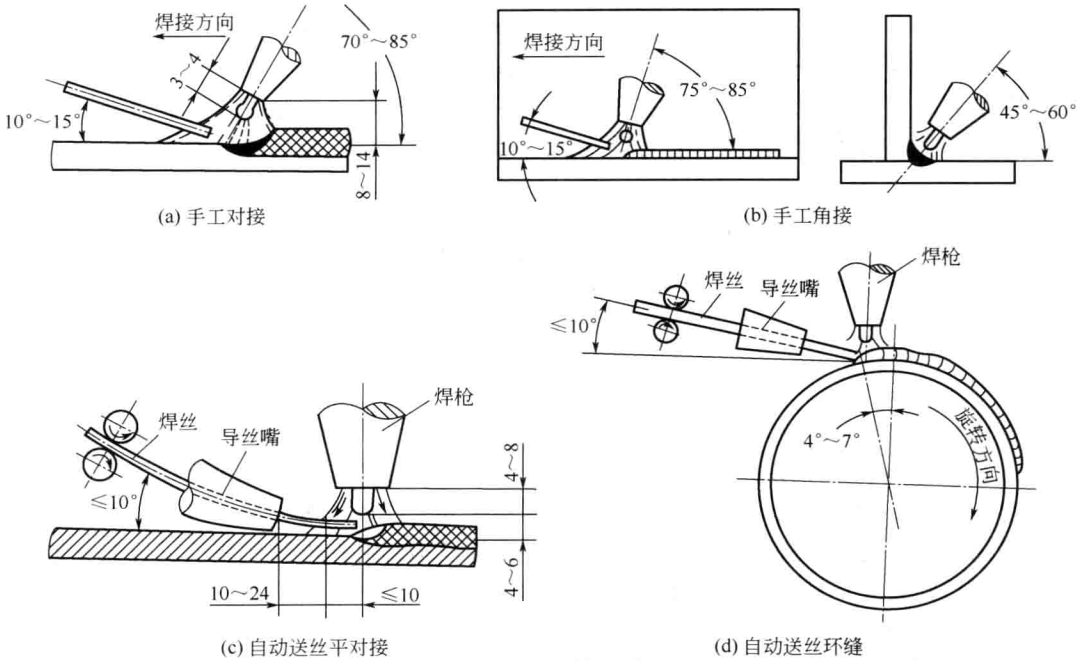


图 4-32　焊枪、焊丝和焊件之间的相对位置

GTAW 一般采用左焊法，焊枪多做直线移动，大厚度的工件有时也做横向摆动。直线移动有两种形式：匀速直线移动和断续直线移动。匀速直线移动：电弧稳定，保护良好，避免重复加热，适用于不锈钢、耐热钢薄件焊接；断续直线移动：焊枪间隔一定的时间停留和前移，一般在焊枪停留时加入焊丝，然后焊枪前移一定距离后再停留加入焊丝。断续直线移动方法适合于 3～6mm 中等厚度材料的焊接。

大厚度的工件焊接时焊枪横向摆动时，焊枪应保持高度不变，平稳地做小幅度的横向摆动，也可分两种形式：一种是月牙形摆动，在两侧略停顿而平稳前移，通过焊缝中心时摆速加快，以保证熔池温度均匀，此法适合于 T 形角焊接以及等厚较宽焊缝的对接焊；另一种是斜圆弧形摆动，此方法适合于不等厚对缝和角缝焊接，焊枪轨迹呈斜圆弧平稳前移，焊枪向厚侧倾斜，并在厚侧停留时间略长。

深坡口打底焊使用陶瓷喷嘴时，可以将喷嘴靠在坡口边缘上，有规则的向前横摆着移动。为了保证两侧钝边熔化良好，可以靠在坡口边缘向两侧稍做弧形摆动。焊丝要送到熔池的根部，连续送丝不要间断，并与焊枪做反方向摆动。但小管打底焊都采用直线移动。

④ 焊枪握法。用右手拇指和食指握住焊枪手柄，其余三指触及工件作为支点（不能将喷嘴靠在坡口边缘上时）。焊接小管时手腕沿管壁转动，指尖始终贴在管壁上，焊接大管时，作为支点的三个手指交替沿管壁行走，以保持运弧平稳。

⑤ 焊丝送丝方法。填充焊丝的加入对焊缝质量的影响很大。若送丝过快，焊缝易堆高，氧化膜难以排除；若送丝过慢，焊缝易出现咬边或下凹。所以送丝动作要熟练。常用的送丝方法有两种：指续法和手动法。

a. 指续法。将焊丝夹在大拇指与食指、中指中间，靠中指和无名指起撑托作用，当大拇指将焊丝向前移动时，食指往后移动，然后大拇指迅速擦焊丝的表面往后移动到食指的地方，大拇指再将焊丝向前移动，如此反复将焊丝不断地送入熔池中。这种方法适用于较长的

焊接接头。

b. 手动法。将焊丝夹在大拇指与食指、中指之间，手指不动，而是靠手或手臂沿焊缝前后移动和手腕的上下反复运动将焊丝送入熔池中。该方法应用比较广泛。按焊丝送入熔池的方式可分为四种：压入法、续入法、点移法和点滴法。

压入法如图 4-33(a) 所示，用手将焊丝稍向下压，使焊丝末端紧靠在熔池边沿。该方法操作简单，但是因为手拿焊丝较长，焊丝端头不稳定，易摆动，造成送丝困难。

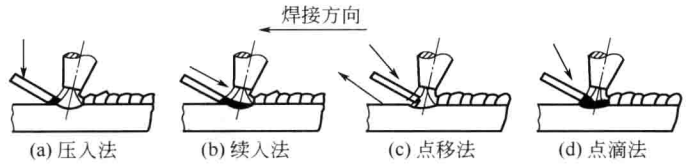


图 4-33 焊丝送入法

续入法如图 4-33(b) 所示，将焊丝末端伸入熔池中，手往前移动，使焊丝连续加入熔池中。该方法适用于细焊丝或间隙较大的接头，但不易保证焊接质量，很少采用。

点移法如图 4-33(c) 所示，以手腕上下反复动作和手往后慢慢移动，将焊丝逐步加入熔池中。采用该方法时由于焊丝的上下反复运动，当焊丝抬起时在电弧作用下，可充分地将熔池表面的氧化膜去除，从而防止产生夹渣，同时由于焊丝填加在熔池的前部边缘，有利于减少气孔。因此应用比较广泛。

点滴法如图 4-33(d) 所示，焊丝靠手的上下反复动作，将焊丝熔化后的熔滴滴入熔池中。该方法与点移法的优点相同，所以比较常用。

焊丝送入角度、送入方式与熟练程度有关，它直接影响到焊缝的几何形状。焊丝应低角度送入，一般为 10°～15°，通常不大于 20°。这样有助于熔化端被保护气覆盖并避免碰撞钨极，使焊丝以滴状过渡到熔池中的距离缩短。送丝动作要轻，不要扰动气体保护层，以免空气侵入。焊丝在进入熔池时，要避免与钨极接触短路，以免钨极烧损落入熔池，引起焊缝夹钨。焊丝末端不要伸入弧柱内，即在熔池和钨极中间，否则，在弧柱高温作用下，焊丝剧烈熔化滴入熔池，引起飞溅并发出乒乒乓乓的响声，从而破坏了电弧的稳定燃烧，结果会造成熔池内部污染，也使焊缝外观成形不好，灰黑不亮。

焊丝熔入熔池大致可分为五个步骤。

ⅰ. 焊枪垂直于工件，引燃电弧形成熔池，当工件被电弧加热到呈现白亮并将发生流动形成熔池时，就要准备将焊丝送入。

ⅱ. 焊枪稍向后移动并倾斜 10°～15°。

ⅲ. 向熔池前方内侧边缘约在熔池的 1/3 处送入焊丝末端，靠熔池的热量将焊丝熔入，不要像气焊那样搅拌熔池（ⅱ、ⅲ同时进行）。

ⅳ. 抽回焊丝，但其末端并不离开保护区，与熔池前沿保持着如分似离的状态，准备再次加入焊丝。

ⅴ. 焊枪前移至熔池前沿形成新的熔池（重复ⅲ、ⅳ、ⅴ动作直至焊接结束）。

⑥ 送丝。送丝可分为外填丝、内填丝和依丝法三种。

a. 外填丝法。外填丝法是电弧在管壁外侧燃烧，焊丝从坡口一侧填加的操作方法。焊枪与焊丝的位置见图 4-32。管道坡口根部间隙的大小随填丝动作、管径大小、管壁厚度而定。对于大直径厚壁管（管径≥219mm、厚度≥18mm）的坡口根部间隙应稍大于焊丝直径，焊接中焊丝连续送入熔池，稍做横向摆动，这样可适当多填些焊丝，在保证坡口两侧熔化良好的情况下也使焊缝有一定的厚度。对于小直径薄壁管，坡口根部间隙一般要求小于或

等于焊丝直径，焊丝在坡口中沿管壁给送，不做横向摆动。焊速稍快，焊缝不必太厚，采用断续送丝或连续送丝均可。

断续送丝法（或称之为“点滴送入法”）：是靠手的反复送拉动作将焊丝端头的熔滴送入熔池，熔化后将焊丝拉回退出熔池，但不离开保护区，焊丝拉回时靠电弧吹力将熔池表面的氧化膜排除掉。此法适用于各种接头，特别是组对间隙小、有垫板的薄板焊缝或角焊缝焊接，焊后焊缝表面呈清晰均匀的鱼鳞状。断续送丝法容易掌握，初学者多采用这种送丝法。但只适用于小电流、慢焊速、表面波纹粗的焊缝，当间隙较大或电流不适合时，用断续送丝法就难于控制焊接熔池，背面容易产生凹陷。

连续送丝法：将焊丝端头插入熔池，利用手指交替移动连续送入焊丝，随着电弧向前不断移动，熔池逐渐形成。此法与自动焊的送丝法相似，其特点是电流大、焊速快、波纹细、成形美观。但需手指连续稳定交替移动焊丝，需要熟练的送丝技能。用连续送丝法焊接间隙较大的工件时，如果掌握的好，可以在快速加焊丝时也不产生凸瘤，仰焊时也不产生凹陷，焊接速度快、质量好。

b. 内填丝法。内填丝法是电弧在管壁外侧燃烧，焊丝从坡口间隙伸入管内向熔池送入的操作方法。焊接中要求坡口间隙始终大于焊丝直径 0.5～1.0mm，否则会造成所谓的卡丝现象，影响焊接顺利进行。为防止间隙缩小，应采取相应措施，如刚性固定，合理的焊接顺序，适当加大间隙等。

外填丝法与内填丝法相比较，由于前者间隙小，所以焊接速度快，填充金属少，操作技术容易掌握；后者适合于操作困难的焊接位置。输油管道有时要求采用内填丝法。只要焊枪能达到，无论什么样的困难位置都能施焊。组对要求不十分严格，即使在局部坡口根部间隙不均匀或少量错边的情况下，也能得到较满意的结果。由于操作时焊工从坡口根部间隙中直接观察焊道成形，故可保证焊缝根部熔透良好。其最大优点是能预防仰焊部位凹陷。

作为焊工应该掌握这两种基本填丝操作方法，以便在不同的焊接部位，根据实际情况进行应用。一般选择原则是：凡焊接操作的空间开阔，送丝没有障碍，视线不受影响的管道焊接，宜采用外填丝法，反之则宜采用内填丝法。实际上，所谓的内填丝法也不可能整条焊缝全部采用，通常只在困难位置或指定时才采用。内外填丝的操作方法应相互结合，视焊接操作方便而选定。

c. 依丝法。依丝法将焊丝弯成圆弧状紧贴在坡口根部间隙处，电弧同时熔化坡口钝边和焊丝，这时要求坡口根部间隙小于焊丝直径。该送丝方法可避免焊丝遮挡焊工视线，适合于困难位置的焊接。

焊丝送入动作要熟练，速度要均匀，快慢适当。过快，焊缝堆积过高，过慢，焊缝凹陷或咬边。

在焊接操作过程中，由于操作不慎，焊丝与钨极相碰，造成瞬间短路。发生所谓的打钨现象，熔池被炸开，一阵烟雾，造成焊缝表面污染和内部夹钨，还破坏了电弧的稳定燃烧。必须立即停止焊接，进行处理。将污染处用机械法处理，直至露出光亮的金属光泽，被污染的钨极应在引弧板上引燃电弧，熔化掉钨极表面的氧化物，直至引弧板上被电弧光照射的斑痕白亮而无黑色，熔池清晰时，方可继续焊接。采用直流电源焊接时，发生打钨现象应重新修磨钨极。

为了便于送丝，观察熔池和焊缝，防止喷嘴烧损，钨极应伸出喷嘴端面 2～3mm，钨极端部与熔池表面的距离（弧长）保持在 3mm 左右，这样可使焊工的视线开阔，送丝方便，避免打钨，从而减少焊缝被污染的可能性。

⑦ 左焊法和右焊法。如图 4-34 所示，手工钨极氩弧焊根据焊枪的移动方向及送丝位置分为左焊法和右焊法。

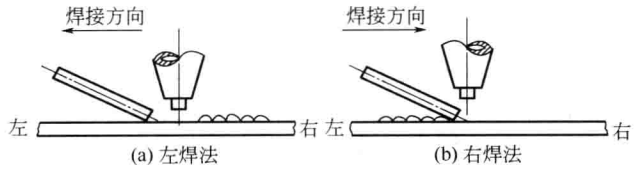


图 4-34　手工钨极氩弧焊左焊法和右焊法

a. 左焊法。焊接过程中焊接热源（焊枪）从接头右端向左端移动，并指向待焊部分的操作法称为左焊法。左焊法焊丝位于电弧前面。该方法便于观察熔池。焊丝常以点移法和点滴法加入，焊缝成形好，容易掌握。因此应用比较普遍。

b. 右焊法。在焊接过程中焊接热源（焊枪）从接头左端向右端移动，并指向已焊部分的操作法称为右焊法。右焊法焊丝位于电弧后面。操作时不易观察到熔池，较难控制熔池的温度，熔深比左焊法深，焊缝较宽，适用于厚板焊接，但比较难掌握。

⑧ 停弧。停弧就是由于某种原因而中途停下来，然后再继续进行焊接。正确的停弧方法，是采用逐渐加快运弧速度后（缩小熔池面积）再收弧的方法，这样可以没有弧坑和缩孔，给下次引弧继续焊接创造条件，加快运弧的长度为 20mm 左右。再引弧焊接时，待熔池形成后，向后压 1～2 个波纹，接头起点不加或少加焊丝，然后转入正常焊接，为了防止产生气孔，保证焊接质量，起点或接头处应适当放慢焊接速度。

⑨ 收弧。收弧也称熄弧，是焊接终止的必须手法。收弧很重要，应高度重视。若收弧不当，易引起弧坑裂纹，缩孔等缺欠，常用收弧方法有以下几种。

a. 焊接电流衰减法。利用衰减装置，逐渐减小焊接电流，从而使熔池逐渐缩小，以至母材不能熔化，达到收弧处无缩孔的目的，普通的 GTAW 焊机都带有衰减装置。

b. 增加焊速法。在焊接终止时，焊枪前移速度逐渐加快，焊丝的给送量逐渐减少，直到母材不熔化为止。基本要点是逐渐减少热量输入，重叠焊缝 20～30mm。此法最适合于环缝，无弧坑，无缩孔。

c. 多次熄弧法。终止时焊速减慢，焊枪后倾角加大，拉长电弧，使电弧热主要集中在焊丝上，而焊丝的给送量增大，填满弧坑，并使焊缝增高，熄弧后马上再引燃电弧，重复两三次，便于熔池在凝固时能继续得到焊丝补给，使收弧处逐步冷却。但多次熄弧后收弧处往往较高，需将收弧处增高的焊缝修平。

d. 应用熄弧板法。平板对接时常应用熄弧板，焊后将熄弧板去掉修平。

实际操作证明：有衰减装置用电流衰减法收弧最好，无衰减装置用增加焊速法收弧最好，可避免弧坑和缩孔，熄弧后不能马上把焊枪移走，应停留在收弧处待 2～5s，用保护气体保护高温下的收弧部位不被氧化。

⑩ 接头。当更换焊丝、修磨钨极等停弧而需要重新接头时，必须在待焊处的前方 5～10mm 处引弧，电弧稳定之后将电弧拉回焊接处。重叠处要少加焊丝，以保证与原焊缝厚薄宽窄均匀一致。接头处如操作不当往往不容易保证质量，所以应尽量减少接头。

部分焊工一时掌握不了焊丝的正确握法，不是以左手的拇指和食指作为送丝动力，而是靠左手前后移动来送丝（气焊送丝法），这就势必经常变换握丝位置而增加接头次数。另外，气焊送丝法为了避免焊丝抖动，握丝处距焊丝末端又不宜过长，每用完这一段焊丝就要停下来倒手，这也必然会增加接头次数。为解决这一矛盾，使用不停弧热接头是个好方法。该方法是当需要变换握丝位置（倒手）而出现接头时，先将焊丝末端和熔池相接触，同时将电弧稍作后移，或引向坡口一边。待熔池凝固与焊丝末端粘在一起的刹那间，迅速变换握丝位置。完成这一动作后，将电弧立即恢复原位，继续焊接。采用热接头法，既能保证质量，又

可提高效率，但要求操作技术熟练，动作快而准。

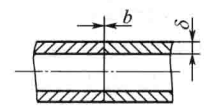
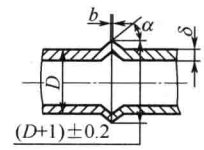
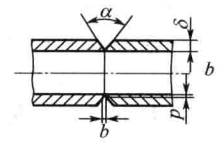
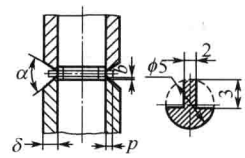
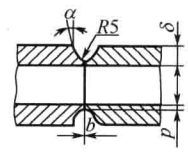
焊接中由于位置变换、逆向分段退焊等原因必须停弧，而出现两段焊缝交接的接头，常见的前后段焊缝接头的类型有：头头相接（水平固定管仰位），尾尾相接（水平固定管平位），头尾相接（分段退焊），尾头相接（转动管）。这些接头由于温度的差别和填充金属量的变化，容易出现未焊透、夹杂、气孔等缺陷。因此要求做到：接头处要修磨成斜坡，不能有死角；重新引弧的位置应重叠 20～30mm，重叠处只加少许焊丝；熔池要贯穿到接头的根部，确保接头处熔透。

（4）钨极氩弧焊工艺

焊接准备工作除了本节要求外，其余参见本章 4.2 节、4.3 节的相关要求。

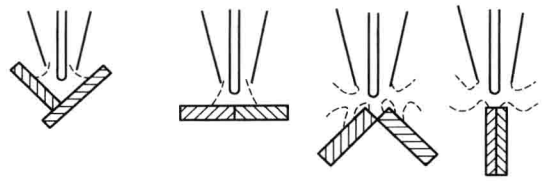
① 坡口形式。由于受许用焊接电流的限制，这种焊接方法主要用于薄板的单层焊和中厚板多层焊的封底焊道，也可用于中厚板的焊接。在保证焊透的情况下，对接焊缝应力求缩小焊缝截面积，减少熔敷金属并考虑操作方便，常用的坡口形式有 V 形、U 形、双面 V 形及 V-U 组合形等。奥氏体型不锈钢管子对接焊坡口形式见表 4-26。

表 4-26　奥氏体型不锈钢管子对接焊坡口形式[1]

坡口形式	焊接方法	坡口尺寸				坡口示意图
		δ/mm	b/mm	α/(°)	p/mm	
I 形坡口	加填充焊丝钨极氩弧焊	≤1.5	≤0.1			
卷边坡口	无填充焊丝钨极氩弧焊	≤2	≤0.1	60±10		
V 形坡口	钨极氩弧焊或钨极氩弧焊打底，其余焊条弧焊完成	2～10	≤0.1	80	0.1～1.0	
V 形坡口	衬熔化垫圈钨极氩弧焊	≥2	<0.2	50	0.1	
U 形坡口	钨极氩弧焊或钨极氩弧焊打底，其余焊条弧焊完成	12	≤0.1	15	0.1～1.0	
		20	≤0.1	13	0.1～1.0	

各种接头中 T 形接头、对接接头的保护效果较好，而角接接头、端接接头因气体流量分散性较大，保护效果较差，如图 4-35 所示。

② 焊前清理。焊接区及填充焊丝均应进行严格清理，清除氧化膜、油污、脏物和水分等污物。



(a) 船形焊的T形接头　(b) 对接接头　(c) 角接接头　(d) 端接接头

图 4-35　焊接接头形式对气体保护焊的影响

③ 焊接参数。

a. 焊接电流。根据焊件厚度、接头形式、焊接位置等因素来选用焊接电流，除此还要考虑钨极所承受电流的能力。焊接电流过大，容易产生烧穿或使焊缝下陷和咬边等缺陷，严重时还会引起钨极烧损或产生夹钨等缺陷。焊接电流过小，电弧燃烧不稳定，会造成未焊透等缺欠。

b. 电弧电压。主要取决于焊接过程中电弧的长度，电弧拉长，电弧电压增大，熔宽增宽，熔深变浅。当电弧电压过高时，会导致焊接电弧不稳，易产生未焊透、未熔合和熔池保护不佳等缺陷。应在保证电弧不短路的情况下，尽量减少弧长，电弧电压一般控制在 9～20V 范围内，最常用的电弧电压为 9～14V。

c. 焊接速度。为了不破坏气流对熔池的保护作用，焊接速度一般不宜过快。在保证焊缝金属和母材金属不被氧化的前提下，为了提高生产效率，尽可能提高焊接速度。提高焊接速度，焊接接头在 450～850℃危险温度停留时间会相对减少，有利于提高焊接接头的耐腐蚀性能。

d. 焊丝。同一牌号的奥氏体不锈钢焊接，焊丝的选择见表 4-27，不同牌号的奥氏体不锈钢焊接，焊丝的选择见表 4-28。不锈钢药芯焊丝的选用见表 2-28～表 2-31。

我国的不锈钢药芯焊丝与 AWS A5.22—1995《耐腐蚀铬及铬镍钢用药芯焊丝》及其他国家不锈钢药芯焊丝的对应关系，见表 2-64。

e. 氩气纯度与流量。氩气纯度不低于 99.9%（体积分数），氩气纯度愈高，保护效果愈好。气体流量过低，气体挺度不足，排除周围空气的能力减弱，造成熔池保护效果不佳；气体流量过大，容易将熔池周围的空气卷入熔池，形成气体紊流，降低保护效果。氩气流量与喷嘴直径大小有关，见式(4-6)。

$$Q=KD \tag{4-6}$$

式中　Q——氩气流量，L/min；

D——喷嘴直径，mm；

K——系数，$K=0.8\sim1.2$，$D>12$mm 时，K 取 1.2；$D<12$mm 时，取 0.8。

$$D=Kd+4 \tag{4-7}$$

式中　D——喷嘴直径，mm；

K——系数，$K=0.8\sim1.2$，$d>4$mm 时，取 1.2，$d<3$mm 时，取 0.8；

d——钨极直径，mm。

氩气流量不仅与喷嘴直径有关，还与焊接电流大小有关，它们之间的参数选择见表 4-29。

f. 电极极性。为了减少钨极烧损，延长钨极寿命，一般采用直流电源正接（工件接电源正极，钨极接电源负极。直流正接在工艺文件上用符号 DC 或 DCSP 表示，DC 是英文 direct current 的缩写；DCSP 是英文 direct current straight polarity 的缩写），也可以用交流钨极氩弧焊机焊接奥氏体型不锈钢。

表 4-27　同一牌号奥氏体不锈钢钨极惰性气体焊焊丝选用[2]

母材	S30408	S30403	S32168	S32608	S31603
焊丝	H0Cr21Ni10	H00Cr21Ni10	H08Cr20Ni10Nb	H08Cr19Ni12Mo	H03Cr19Ni12Mo
母材	S31688	S31708	S30908	S31008	
焊丝	H03Cr19Ni12Mo2Cu2	H08Cr19Ni14Mo3	H08Cr26Ni21	H08Cr26Ni21	

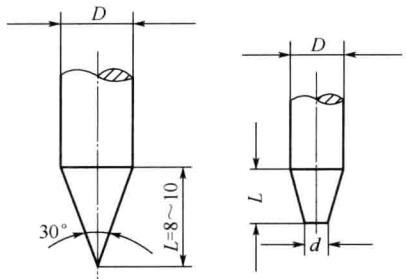
表 4-28　不同牌号奥氏体不锈钢之间的钨极惰性气体保护焊焊丝选用[2]

母材	S30403	S30808	S31008	S31608	S31603	S31708	S32168
S30408	H03Cr21Ni10	H08Cr21Ni10 H12Cr24Ni13	H08Cr21Ni10 H08Cr26Ni21	H08Cr21Ni10 H08Cr19Ni12Mo2	H08Cr21Ni10 H03Cr19Ni12Mo2	H08Cr21Ni10 H03Cr19Ni12Mo2 H08Cr19Ni14Mo3	H08Cr21Ni10
S30403		H08Cr21Ni10 H12Cr24Ni13	H03Cr21Ni10 H08Cr26Ni21	H03Cr21Ni10 H08Cr19Ni12Mo2	H03Cr21Ni10 H03Cr19Ni12Mo2	H08Cr21Ni10 H08Cr19Ni12Mo2 H08Cr19Ni14Mo3	H03Cr21Ni10 H08Cr20Ni10Nb
S30908			H12Cr24Ni13 H08Cr26Ni21	H12Cr24Ni23 H08Cr19Ni12Mo2	H12Cr24Ni13 H03Cr19Ni12Mo2	H12Cr24Ni13 H08Cr19Ni12Mo2	H12Cr24Ni13 H08Cr20Ni10Nb
S31008				H08Cr19Ni12Mo2	H03Cr19Ni12Mo2	H08Cr19Ni14Mo3	H08Cr20Ni10Nb H08Cr26Ni21
S31608					H03Cr19Ni12Mo2	H08Cr19Ni12Mo2 H08Cr19Ni14Mo3	H08Cr20Ni10Nb H08Cr19Ni12Mo2
S31603						H03Cr19Ni12Mo2 H08Cr19Ni14Mo3	H03Cr19Ni12Mo2
S31708							H08Cr19Ni14Mo3 H08Cr20Ni10Nb

表 4-29 焊接电流、喷嘴直径和保护气体流量对应关系

焊接电流/A	DCSP		AC	
	喷嘴直径/mm	保护气体流量/(L/min)	喷嘴直径/mm	保护气体流量/(L/min)
10～100	4～9.5	4～5	8～9.5	6～8
100～150	4～9.5	4～7	9.5～11	7～10
150～200	6～13	6～8	11～13	7～10
200～300	8～13	8～10	13～16	8～15
300～500	13～16	9～12	16～19	8～15

g. 钨极。钨极有纯钨极、钍钨极和铈钨极 3 种，其中铈钨极（活化钨极）比纯钨极的工艺性好得多，且对人体损害小，推荐首选使用。钨极直径与相应焊接电源和极性条件下的焊接电流允许值，参见表 4-30、表 4-31。施焊前，要将钨极端部磨成一定形状，通常有尖头和平头等形状。采用较小的焊接电流施焊时，要选用小直径的钨棒，端头磨成尖头形状，锥顶角度约 30°，如图 4-36(a) 所示。当采用大的焊接电流施焊时，钨极应磨成带有平顶的锥形形状，如图 4-36(b) 所示。平顶锥形的端头可避免尖端过热熔化，减少钨极端部损耗，同时还有利于防止阴极斑点的游动，从而稳定电弧。钨极端头愈尖愈易烧损，烧损后将导致电弧电压增高，直接影响熔池保护效果，也会使焊缝氧化，甚至产生焊缝宽度不均的缺陷。



(a) 尖形的钨极端头 (b) 平顶锥形的钨极端头

图 4-36 钨极端部磨削形状

$L=(2\sim4)D$，$d=(1/3\sim1/4)D$

表 4-30 钨极直径与焊接电流的选择[1]

钨极直径/mm	直流正接/A		交流/A	
	纯钨	钍钨、铈钨	纯钨	钍钨、铈钨
0.5	2～20	2～20	2～15	2～15
1.0	10～75	10～75	15～55	15～70
1.6	40～130	60～150	45～90	60～125
2.0	75～180	100～200	65～125	85～160
2.5	130～230	160～250	80～140	120～210
3.2	160～310	225～330	150～190	150～250
4.0	275～450	350～480	180～260	240～350
5.0	400～625	500～675	240～350	330～460

表 4-31 钨极端部形状和电流范围[8]

钨极直径/mm	尖端直径/mm	尖端角度/(°)	恒定电流/A	脉冲电流/A
1.0	0.125	12	2～15	2～25
1.0	0.25	20	5～30	5～60

续表

钨极直径/mm	尖端直径/mm	尖端角度/(°)	恒定电流/A	脉冲电流/A
1.6	0.5	25	8～50	8～100
1.6	0.8	30	10～70	10～140
2.4	0.8	35	12～90	12～180
2.4	1.1	45	15～150	15～250
3.2	1.1	60	20～200	20～300
3.2	1.5	90	25～250	25～350

h. 钨极伸出长度。钨极伸出长度指钨极超出喷嘴端面的长度。钨极伸出的短，可以使喷嘴与焊件相对靠近，气体保护效果好，通常钨极伸出长度为2～8mm。

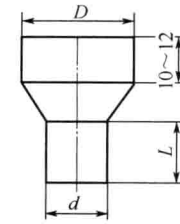


图 4-37　钨极氩弧焊用喷嘴

i. 喷嘴（nozzle）。常用钨极氩弧焊用喷嘴结构如图 4-37 所示，D 端与焊枪连接段为长 10～12mm 的圆柱体；小圆柱的末端部分的长度 L 不应小于喷嘴孔径，其长度以 1.2～1.5 倍喷嘴孔内径（d）为宜。喷嘴的锥形部分有缓冲气流的作用，可改善保护效果。为了提高气体保护效果，喷嘴的内壁应光滑、不允许有棱角、凹槽，不得沾上飞溅物。为了使氩气从喷嘴喷出时成为稳定的层流，提高气体保护效果，焊枪应有气体透镜（类似稳定装置）、多孔性挡板（可用 1～2 层铜丝网组成，网目数不得少于 600～700 孔/cm^2）及缓冲室。气体流量不变，增大喷嘴内径时，气体挺度下降，对熔池保护减弱；气体流量不变，喷嘴内径变小时，气体的流速增加过多，可造成气体紊流，也会造成保护效果不好。实践证明，在手工钨极氩弧焊时，喷嘴内径在 8～20mm 范围内，气体流量以 10～25L/min 为宜。当喷嘴和气体流量一定时，喷嘴至焊件之间的距离愈短，则保护效果愈好，但过小会影响焊工的视线和引起钨极与焊件短路。对于喷嘴内径为 8～20mm 的喷嘴，距离焊件一般不超过 15mm。

j. 焊接电流、喷嘴直径和保护气体流量对应关系。焊接电流、喷嘴直径和保护气体流量对应关系见表 4-29。

k. 冷却水流量。焊枪额定电流大于 160A 时，焊接前焊枪须通冷却水，焊接完成须滞后停止冷却水。冷却水流量不得小于 1L/min，否则焊机无法启动或易烧毁焊枪。

④ 提高气体保护效果的措施。为了使焊接接头正面和背面得到可靠保护，可采用图 4-38～图 4-40 所示的工艺装备来提高保护效果。

⑤ 操作技术。装配定位焊，应采用与正式焊接相同的焊丝和工艺，定位焊缝的长度距

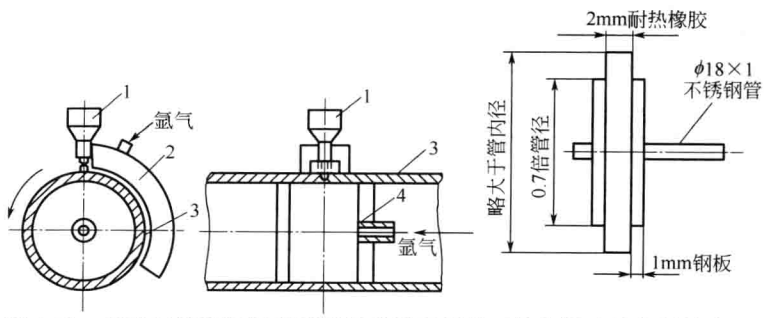


图 4-38　管子对接环缝焊接用拖罩及反面保护（具体尺寸见右侧放大图）

1—焊枪；2—环形托罩；3—管子；4—挡板

离应根据焊件厚度与结构刚度而定。一般每段定位焊缝长度为 5～15mm，焊缝厚度不大于 2mm。例如直径 ϕ60mm 以下的不锈钢管子，用定位焊点固定 2～3 处，定位焊缝长度约 5mm。直径 ϕ159mm 的不锈钢管子，用定位焊点固定 4 处，定位焊缝长度约 10mm。定位焊缝须保证质量，不允许存在焊接缺陷。对接焊时，焊枪与焊件之间保持后倾，钨极与焊件之间倾角为 75°～80°，填充焊丝与焊件倾角为75°～15°，希望填充焊丝与焊件倾角越小越好，过大则容易扰乱气体保护；角接焊时，除了对接焊的要求外，还要求与板之间的相对位置。

填充焊丝时动作要缓、稳，不要破坏氩气对熔池的保护。不能像气焊那样在熔池中搅拌，应一滴一滴地缓慢送入熔池，或者将焊丝端头浸入熔池中不断填入，并向前移动，焊丝端头不能脱离气体保护区。要防止焊丝与钨极接触、碰撞，否则加剧钨极烧损，而引起焊缝夹钨。焊接收弧时，应减慢焊接速度，增加焊丝填充量。焊接薄板时，为了防止变形可采用铜衬垫，并将焊件压贴于衬垫上，以利于散热。在铜垫板上加工出凹槽，凹槽对准焊缝以便背面充氩气保护，见图 4-39、图 4-40。电弧熄灭后，焊枪喷嘴仍须对准熔池，以延长氩气保护效果。

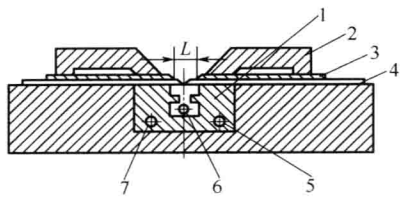


图 4-39　对接焊背面通氩气保护垫板
1—铜垫板；2—压板；3—纯铜冷却板；4—焊件；5—出水管；6—进气管；7—进水管；L—压板间距

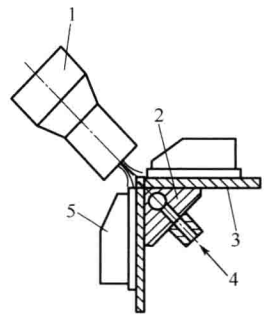


图 4-40　角焊背面保护罩和加强冷却的装置
1—焊枪；2—背面保护垫板；3—焊件；4—保护气体；5—铜块

实践证明，从焊接接头的颜色，也可以判断焊接区的保护效果，详见表 4-32。

表 4-32　奥氏体型不锈钢焊接接头颜色与保护效果的关系

焊接接头颜色	银白、金黄	蓝	红灰	灰	黑
保护效果	好	良好	较好	不良	不好

机械操作不加填充焊丝的钨极氩弧焊焊接工艺参数，见表 4-33；机械操作加填充焊丝的钨极氩弧焊焊接工艺参数，见表 4-34；钨极氩弧焊加填充焊丝焊接薄板奥氏体不锈钢焊接参数，见表 4-35；手工钨极氩弧焊加填充焊丝的焊接参数，见表 4-36～表 4-38，奥氏体不锈钢管钨极氩弧焊焊接参数，见表 4-39。

表 4-33　机械操作不加填充焊丝的钨极氩弧焊焊接工艺参数[1]

板厚 /mm	接头形式	钨极直径 /mm	焊接电流 /A	焊接速度 /(cm/min)	氩气流量 /(L/min)	备注
0.5	I形	2	60～70	48～52	7～8	焊件装于气压琴键式纵缝焊夹具上，实现单面焊背面成形
0.8		2	60～70	40～50	8	
1.0		2.5	75～85	35～40	8	
1.2		2.5	110～120	30～35	8	

表 4-34　机械操作加填充焊丝的钨极氩弧焊焊接工艺参数[1]

材料厚度/mm	坡口形式	焊接电流/A	电弧电压/V	电极极性	送丝速度/(cm/min)	焊接速度/(cm/min)	电极牌号及尺寸/mm	焊丝规格/mm	喷嘴直径/mm	焊丝牌号	氩气流量/(L/min)
0.8	I形坡口	85～95	7.3～7.7	DCSP	24～26	46～50	WCe-20/ϕ2	ϕ0.8	ϕ8	见表 2-18、表 4-27	8～9
1.0		100～110	7.8～8.2	DCSP	26～28	42～46	WCe-20/ϕ3	ϕ0.8	ϕ12		9～10
1.2		120～140	8.0～8.4	DCSP	28～30	38～42	WCe-20/ϕ3	ϕ0.8	ϕ12		9～10
1.5		150～170	8.2～8.5	DCSP	12～14	34～36	WCe-20/ϕ3	ϕ1.2	ϕ16		10～11
1.8		200～220	8.4～8.6	DCSP	14～16	32～34	WCe-20/ϕ3	ϕ1.2	ϕ16		10～11
2.0		240～260	8.5～8.7	DCSP	8.5～9	30～32	WCe-20/ϕ4.0	ϕ1.6	ϕ16		11～12
2.5		290～310	8.6～8.8	DCSP	9.0～9.5	28～30	WCe-20/ϕ4.0	ϕ1.6	ϕ16		11～12
3.0		340～360	9.5～9.2	DCSP	9.5～10.0	26～28	WCe-20/ϕ5.0	ϕ1.6	ϕ16		11～12

注：背面加铜垫板，在琴键式夹具上进行单面焊双面成形。

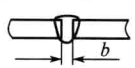
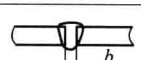
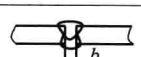
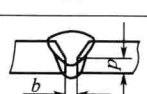
表 4-35　手工钨极氩弧焊加填充焊丝焊接薄板奥氏体不锈钢焊接参数[9]

板厚/mm	接头形式	坡口间隙/mm	钨极直径/mm	焊丝直径/mm	焊接电流/A	电弧电压/V	焊接速度/(mm/min)	喷嘴直径/mm	氩气流量/(L/min)	电流类型
1.0+1.0	对接	0	2	1.6	35～75	10～12	150～550	8	7～8	AC
1.0+1.0	对接	0	2	1.6	30～60	10～12	110～450	8	7～8	DCSP
1.2+1.2	对接	0	2	1.6	50	10～12	250	8	7～8	DCSP
1.5+1.5	对接	0～0.5	2	1.6	45～85	10～12	120～500	8	7～8	AC
1.5+1.5	对接	0～0.5	2	1.6	40～75	10～12	80～300	8	7～8	DCSP
1.0+1.0	角接	0	2	—	45	10～12	230	8	7～8	AC
1.5+1.5	T形接头	0～0.5	2	1.6	40～60	10～12	60～80	8	7～8	AC

表 4-36　手工钨极氩弧焊加填充焊丝焊接奥氏体不锈钢焊接参数(一)[1]

板厚/mm	坡口形式	坡口间隙/mm	钨极直径/mm	焊丝直径/mm	焊接电流/A	电弧电压/V	焊接速度/(mm/min)	喷嘴直径/mm	氩气流量/(L/min)	电流类型
0.5	I形坡口	0	1.0	—	15～20	10～12	20～30	8	7～8	DCSP,较大电流适用于在夹具垫板上焊接,较小电流适用于悬空焊接(不加垫板)
0.8		0	1.6	1.0	20～30	10～12	20～30	8	7～8	
1.0		0	2.0	1.6	30～50	10～12	20～30	8	7～8	
1.5		0～0.5	2.0	1.6	40～70	10～12	20～30	8	7～8	
2.0		0.5～1.0	3.0	2.0	80～110	10～12	20～30	8	7～8	
2.5	V形坡口 $\alpha=60°\sim70°$ $p=0\sim0.5$mm	1.0～1.5	3.0	2.0	95～130	10～12	20～30	8	7～8	
3.0		2.5～3.0	3.0	2.5	110～160	10～12	20～30	8	7～8	
4.0		2.5～3.0	3.0	2.5	120～180	10～12	15～25	10	8～10	
>4.0		2.5～3.0	3.0	2.5	150～250	10～12	15～25	10	8～10	

表 4-37　手工钨极氩弧焊加填充焊丝焊接奥氏体不锈钢焊接参数(二)[10]

板厚/mm	坡口形式	焊接位置	层数	坡口尺寸/mm		电极直径/mm	焊接电流/A	焊接速度/(mm/min)	焊丝直径/mm	氩气流量/(L/min)	喷嘴直径/mm	备注
				间隙 b	钝边 p							
1		平焊	1	0	—	1.6	50～80	100～120	1	4～6	11	
		立焊	1	0	—	1.6	50～80	80～100	1	4～6	11	
2.4		平焊	1	0～1	—	1.6	80～120	100～120	1～2	6～10	11	
		立焊	1	0～1	—	1.6	80～120	80～100	1～2	6～10	11	
3.2		平焊	2	0～2	—	2.4	105～150	100～120	2～3.2	6～10	11	
		立焊	2	0～2	—	2.4	105～150	80～120	2～3.2	6～10	11	
4		平焊	2	0～2	1.6～2	2.4	150～200	100～120	3.2～4	6～10	11	
		立焊	2	0～2	1.6～2	2.4	150～200	80～120	3.2～4	6～10	11	
6		平焊	3(1∶1)	0～2	0～2	2.4	150～200	100～150	3.2～4	6～10	11	
		立焊	2(1∶1)	0～2	0～2	2.4	150～200	80～100	3.2～4	6～10	11	

续表

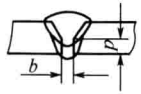
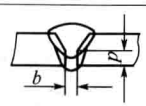
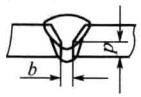
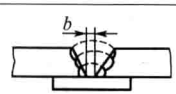
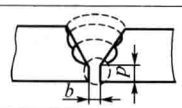
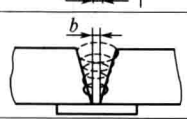
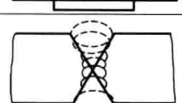
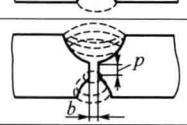
板厚/mm	坡口形式	焊接位置	层数	坡口尺寸/mm		电极直径/mm	焊接电流/A	焊接速度/(mm/min)	焊丝直径/mm	氩气流量/(L/min)	喷嘴直径/mm	备注
				间隙 b	钝边 p							
6		平焊	2(1∶1)	0～2	0～2	2.4	180～230	100～150	3.2～4	6～10	11	单面焊
		立焊	2(1∶1)	0～2	0～2	2.4	150～200	100～150	3.2～4	6～10	11	
6		平焊	3	0	2	2.4	140～160	120～160	—	6～10	11	单面焊
		立焊	3	0	2	2.4	150～200 150～200	120～160 80～120	3.2～4	6～10 6～10	11	
6		平焊	3	1.6	1.6～2	1.6 2.4	110～150 150～200	60～80 100～150	2.6～3.2	10～16	11	双面焊
		立焊	3	1.6	1.6～2	1.6 2.4	110～150 150～200	60～80 80～120	2.6～3.2	6～10	11	
6		平焊	3	3～5	—	2.4	180～220	80～150	3.2～4	6～10	11	双面焊
		立焊	3	3～5	—	2.4	150～200	80～150	3.2～4	6～10	11	
12		平焊	6(5∶1)	0～2	0～2	2.4	150～200	150～200	3.2～4	6～10	11	背面清根
		立焊	8(7∶1)	0～2	0～2	2.4	150～200	150～200	3.2～4	6～10	11	
12		平焊	6	0～2	0～2	2.4 3.2	200～250	100～200	3.2～4	6～10	11～13	垫板
		立焊	8	0～2	0～2	2.4 3.2	200～250	100～200	3.2～4	6～10	11～13	
12		平焊	6	0～2	—	2.4	180～220	50～200	3.2～4	6～10	11	气垫
		立焊	8	0～2	—	2.4	150～200	50～200	3.2～4	6～10	11	
22		平焊	10(6∶4)	0～1	—	2.4 3.2	200～250	100～200	3.2～4	6～10	11～13	背面清根
		立焊	12(8∶4)	0～1	—	2.4 3.2	200～250	100～200	3.2～4	6～10	11～13	
38		平焊	18 (9∶9)	0～2	2～3	2.4 3.2	250～300	100～200	4～5	10～15	11～13	背面清根
		立焊	22 (11∶11)	0～2	2～3	2.4 3.2	250～300	100～200	4～5	10～15	11～13	

表 4-38　手工钨极氩弧焊加填充焊丝焊接奥氏体不锈钢焊接参数（三）[10]

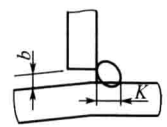
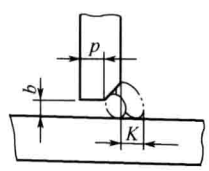
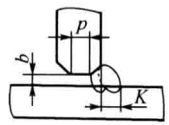
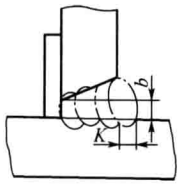
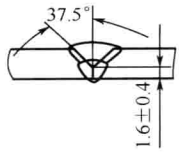
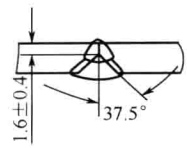
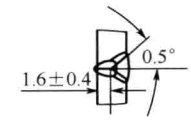
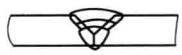
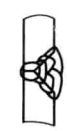
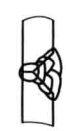
板厚/mm	坡口形式	焊脚 K/mm	焊接位置	层数	坡口尺寸/mm		电极直径/mm	焊接电流/A	焊接速度/(mm/min)	焊丝直径/mm	氩气流量/(L/min)	喷嘴直径/mm	备注
					间隙 b	钝边 p							
6		6	平焊 立焊	1 1	0～2	—	2.4	180～220 180～220	50～100 50～100	3.2 3.2	6～10 6～10	11 11	
12		10	平焊 立焊	2 2	0～2	—	2.4	180～220 180～220	50～100 50～100	3.2 3.2	6～10 6～10	11 11	
6		2	平焊 立焊	3 3	0～2	0～3	2.4	180～220 180～220	80～200 80～200	3.2～4 3.2～4	6～10 6～10	11 11	
12		3	平焊 立焊	6～7 6～7	0～2	0～3	2.4 3.2	200～250 200～250	80～200 80～200	3.2～4 3.2～4	8～12 8～12	13 13	
22		5	平焊 立焊	18～21 18～21	0～2	0～3	2.4 3.2	200～250 200～250	80～200 80～200	3.2～4 3.2～4	8～12 8～12	13 13	
12		3	平焊 立焊	3～4 3～4	0～2	2～4	2.4 3.2	200～250 200～250	80～200 80～200	3.2～4 3.2～4	8～12 8～12	13 13	
22		5	平焊 立焊	6～7 6～7	0～2	2～4	2.4 3.2	200～250 200～250	80～200 80～200	3.2～4 3.2～4	8～12 8～12	13 13	
6		3	平焊 立焊	2～3 2～3	3～6	—	2.4 3.2	180～220 180～220	80～200 80～200	3.2～4 3.2～4	6～10 6～10	13 13	
12		4	平焊 立焊	6～7 6～7	3～6	—	2.4 3.2	200～250 200～250	80～200 80～200	3.2～4 3.2～4	8～12 8～12	13 13	垫板
22		6	平焊 立焊	25～30 25～30	3～6	—	2.4 3.2	200～250 200～250	80～200 80～200	3.2～4 3.2～4	8～12 8～12	13 13	垫板

表 4-39　奥氏体不锈钢管钨极氩弧焊焊接参数[10]

板厚/mm	管子水平转动 （横焊）	管子水平固定 （全位置焊）	管子垂直固定 （横焊）
1.6～3.2	 1～2 层　80～110A 正极性	 2 层 5～100A 正极性	 2 层　5～100A 正极性
6.4～7.9	 2～3 层 130～150A 正极性	 3 层 120～150A 正极性	 3 层　120～150A 正极性
9.5±1.6	 4 层 150～200A 正极性	 5 层 150～180A 正极性	 5 层　150～180A 正极性
12.7±1.6	 5 层　180～200A 正极性	 6 层　150～180A 正极性	 7 层　150～180A 正极性
15.9±1.6	 6 层　180～200A 正极性	 6～7 层　150～200A 正极性	 8 层　150～200A 正极性
19.1±1.6	 7 层　180～200A 正极性	 8 层　150～200A 正极性	 9～13 层　150～180A 正极性
25.4±1.6	 9 层　180～200A 正极性	 11 层　180～200A 正极性	 7 层　180～200A 正极性

4.3.2 钨极脉冲氩弧焊

（1）钨极脉冲氩弧焊工作原理

钨极脉冲氩弧焊是在普通钨极氩弧焊基础上发展起来的一种新的焊接工艺，通过控制焊接电流按一定频率周期地变化。每一次脉冲电流通过时，焊件被加热熔化，形成一个点状的熔池。脉冲电流处于停歇期间，点状熔池冷凝，电弧由基值电流维持燃烧（输入给焊件的能量很小），即以一个较小的基值电流来维持一个电弧的电离通道，以便下一次脉冲电流导通时，脉冲电弧能可靠地燃烧，熔化金属，形成一个新的焊点。只要合理地调节间歇时间和适当的焊枪移动速度，保证相邻两焊点之间有一定的相互重叠量，就可获得一条连续致密的焊缝。脉冲电路原理见图 4-41。

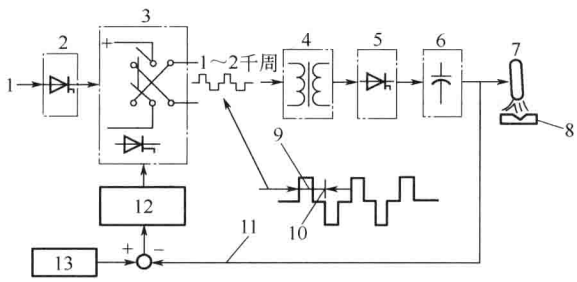


图 4-41 晶闸管逆变的脉冲电路原理图

1—交流电源；2—整流器；3—晶闸管逆变；4—变压器；5—整流器；6—滤波；7—电极；8—母材金属；9—脉冲时间；10—间歇时间；11—反馈信号；12—控制器；13—基准信号

（2）钨极脉冲氩弧焊工艺特点及其适用范围

在焊接厚度小于 1mm 奥氏体型不锈钢箔片和金属软管管坯时，若采用普通氩钨极弧焊，焊接电流只允许用到几安培或十几安培。虽然所选用的钨极直径可以相应减小，但是电流密度仍然太小，导致钨极局部的极斑飘移、电弧不稳；如果焊接电流调得大些，会使焊件过热而烧穿。为了克服上述缺点，且又能保证连续焊接，在 20 世纪 60 年代研制成功了气体保护脉冲电弧焊。它的工艺特点及其适用范围如下。

① 可调工艺参数多，可以精确地控制待焊件的热输入和熔池的形状及尺寸。因而可提高焊缝抗烧穿和熔池的保持能力，易获得均匀熔深。所以特别适用于薄板（薄至 0.1mm）焊接和全位置焊接以及单面焊背面成形的焊接工艺。

② 可以用较低的热输入获得较大的熔深，这样可以减少焊接热影响区和焊件变形。

③ 在焊接过程中，脉冲电流对点状熔池有较强的搅拌作用，而且熔池金属冷凝快，高温停留时间短，焊缝金属组织致密，可以减少敏感材料产生裂纹的倾向。对于奥氏体不锈钢还能提高焊接接头的耐腐蚀性能。

④ 每个焊点加热和冷却迅速，很适合于焊接导热性能强或厚度特别大的焊件。

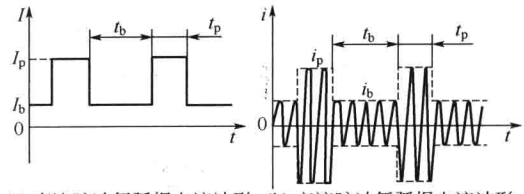
⑤ 焊缝成形美观，质量稳定，焊接接头力学性能高于普通钨极氩弧焊焊接接头力学性能。

根据脉冲频率不同，可分为低频脉冲氩弧焊和高频脉冲氩弧焊。钨极脉冲氩弧焊可根据焊件的厚薄来选择是否填加焊丝，也可以用氦气作为保护气体。

（3）低频脉冲氩弧焊

① 基本原理。焊接电流的大小（直流电或交流电的有效值）呈周期性脉冲变化，脉冲的频率，从每秒接近于一次至几次，至多不过十几次，即以低频脉冲的方法供给电流脉冲。图 4-42 为常见的脉冲电流波形，从图中可以看出脉冲焊时的电流由两个电流组成：脉冲电流和基值电流；焊接时间也是由脉冲电流持续时间和基值电流持续时间两部分组成。它们是用来调节和控制焊缝热输入的主要参数。在一个脉冲电流期间，基本金属熔化到一定的熔深；随之，马上转变为一个小电流（基值电流），它的主要作用是维持电弧不至于熄灭，也提供一个熔池冷却凝固条件，使焊件不至于烧穿。其实，脉冲氩弧焊所完成的连续焊缝是由

许多焊点搭接而成的。焊接电流周期性变化，不仅能保证得到一定的熔深，又不至于焊穿工件，而且随着频率节奏可以得到波纹美观的焊缝。通过电弧脉冲变化，使焊接接头金相组织变得均匀，还细化了晶粒，从而提高了焊接接头的力学性能和耐腐蚀能力。所以用脉冲氩弧焊焊接奥氏体型不锈钢薄件和中厚件是非常有益的。



(a) 直流脉冲氩弧焊电流波形　(b) 交流脉冲氩弧焊电流波形

图 4-42　钨极脉冲氩弧焊电流波形

I_p—直流脉冲电流；i_p—交流脉冲电流幅值；I_b—直流基值电流；i_b—交流基值电流幅值；t_p—脉冲电流持续时间；t_b—基值电流持续时间

② 工艺参数的选择。脉冲钨极氩弧焊的工艺参数主要有脉冲电流幅值（I_p 或 i_p）、基值电流（I_b 或 i_b）、脉冲电流持续时间（t_p）、基值电流持续时间（t_b），其中交流脉冲参数 i_p、i_b 分别指脉冲电流和基值电流在持续时间内的有效值。此外还有脉幅比 R_A、脉宽比 R_W、脉冲周期 T、脉冲频率 f，各参数之间的关系如下。

$$R_A=\frac{I_p}{I_b} \tag{4-8}$$

$$R_W=\frac{t_p}{t_p+t_b} \tag{4-9}$$

$$T=t_p+t_b \tag{4-10}$$

$$f=\frac{1}{T} \tag{4-11}$$

脉冲钨极氩弧焊的工艺参数，通常按下述原则和步骤选择。

a. 对于一定的母材厚度，脉冲电流 I_p（或 i_p）取决于被焊母材的种类，而与母材厚度无关，所以通常先按被焊材料选择 I_p（或 i_p），然后再按母材厚度决定脉冲电流维持时间 t_p，不同材料及厚度的 I_p（或 i_p）及 t_p 值可参考图 4-43 进行选择。当焊接薄件时，I_p（或 i_p）值应选低于图示的数值，同时适当延长 t_p 值；焊接厚件时，I_p 或 i_p 值应稍高于图示的数值，并适当缩短 t_p 值。

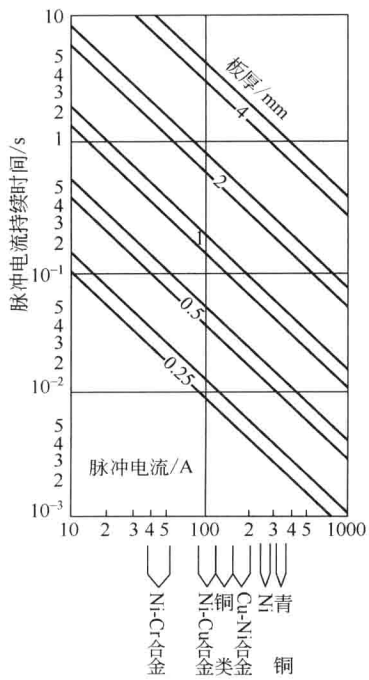


图 4-43　钨极脉冲氩弧焊电流波形

b. 基值电流 I_b（或 i_b）与基值电流维持时间 t_b 相互要匹配，应保证电弧不熄弧和熔池在基值电流期间得以凝固。通常基值电流 I_b 是脉冲电流 I_p（或 i_p）的 10%～20%，基值电流维持时间 t_b 为脉冲电流持续时间 t_p 的 1～3 倍。

c. 脉幅比 R_A 和脉宽比 R_W 值较大时，脉冲特点较显著，有利于克服热裂纹，但过大会增加咬边倾向。需在焊接过程中对焊接速度进行合理调节来控制熔透率，避免产生热裂纹和咬边。

d. 焊接速度要和脉冲频率相匹配，以保证焊点间距的要求，它们之间的关系是：

$$L_W=\frac{V_W}{2.16f} \tag{4-12}$$

式中　L_W——焊点间距，mm；

V_W——焊接速度，cm/min；

f——脉冲频率，Hz。

L_W 不能太大，否则焊点之间无重叠量，而得不到连续致密的焊缝，常用频率一般低于10Hz，可参考表4-40选用。不锈钢脉冲钨极氩弧焊焊接工艺参数，可参考表4-41、表4-42。

表4-40 脉冲钨极氩弧焊常用脉冲频率范围

焊接方法	手工焊	下列焊接速度的自动焊/(cm/min)			
		20	28	37	50
脉冲频率/Hz	1～2	≥3	≥4	≥5	≥6

表4-41 不锈钢脉冲钨极氩弧焊焊接条件[1]

板厚/mm	电流/A		持续时间/s		电流种类及电极极性	脉冲频率/Hz	弧长/mm	焊接速度/(cm/min)
	脉冲	基值	脉冲	基值				
0.3	20～22	5～8	0.06～0.08	0.06	DCSP	8	0.6～0.8	50～60
0.5	55～60	10	0.08	0.06		7	0.8～1.0	55～60
0.8	85	10	0.12	0.08		5	0.8～1.0	80～100

表4-42 机械操作钨极脉冲氩弧焊焊接奥氏体型不锈钢导管全位置的焊接参数[1]

规格/mm	焊接电流/A		持续时间/s		弧长/mm	焊接速度/(cm/min)	氩气流量/(L/min)	
	脉冲	基值	脉冲	基值			喷嘴	管内
ϕ6×1	23～42	11～13	0.1	0.1	0.7～0.9	16～19	14～16	2.5～3.5
ϕ8×1	18～38	11～13	0.1	0.1	0.7～0.9	12～15	15～20	2.5～3.5
ϕ14×1.5	41～60	19～27	0.2	0.2	0.7～0.9	13～16	15～20	2.0～3.0
ϕ18×1	65～90	20～25	0.3	0.4	0.7～1.2	8～10	7～10	5.0～7.0
ϕ28×1	75～110	25～30	0.4	0.5	0.7～1.2	8～10	7～10	5.0～7.0

(4) 高频脉冲钨极氩弧焊

高频脉冲钨极氩弧焊与低频脉冲氩弧焊的不同之处，是焊接电流以每秒钟几千次甚至几万次的极高频率变化着。这样的高频脉冲电流使电弧的磁收缩效应比较强烈，电弧直径受到的压缩更为激烈，增强了电弧的挺度。同时使熔池能很好地搅拌，改善了焊缝的冶金性能，特别适合铝及铝合金的焊接。高频脉冲电弧产生的压力还导致超声振动，它可以增强熔化金属的流动性。这些都有利于细化晶粒，减少焊缝气孔，使焊缝成形美观。在焊接电流平均值相等的情况下，高频脉冲钨极氩弧焊的焊接速度可比普通钨极氩弧焊提高1倍，这就必然会缩短焊缝金属的高温停留时间，对改善奥氏体型不锈钢的耐蚀性是有益的。但是，这种焊接方法在施焊过程中有刺耳的噪声。

有关脉冲钨极氩弧焊机的型号很多，表4-43列出了国内几种脉冲钨极氩弧焊机型号及其主要技术性能，可供选用。

表4-43 几种国产脉冲钨极氩弧焊机型号及其主要技术性能[1]

技术参数 \ 型号	WSM-100	WSM-200	WSM-300	WSM-400	WSM-500	WZM3-250
电源电压/频率	380V/50Hz	380V/50Hz	380V/50Hz	380V/50Hz	380V/50Hz	380V/50Hz
额定焊接电流/A	100	200	300	400	500	250

续表

技术参数 \ 型号	WSM-100	WSM-200	WSM-300	WSM-400	WSM-500	WZM3-250
基值电流/A	10～100	20～200	30～300	40～400	50～500	脉冲周期调节范围 0.2～0.6s
峰值电流/A	10～100	10～100	30～300	40～400	50～500	焊接电流调节范围 20～300A
脉冲频率/Hz	0.5～50	0.5～50	0.5～50	0.5～50	0.5～50	
占宽比/%	20～80	20～80	20～80	20～80	20～80	
缓升时间/s	0.5～10	0.5～10	0.5～10	0.5～10	0.5～10	12
下降时间/s	0.5～20	0.5～20	0.5～20	0.5～20	0.5～20	19
负载持续时间/s	60	60	60	60	60	60
预通气时间/s	0.5～10	0.5～10	0.5～10	0.5～10	0.5～10	2
滞后断气时间/s	0.5～20	0.5～20	0.5～20	0.5～20	0.5～20	5

4.3.3　熔化极气体保护焊

钨极氩弧焊虽然能获得优良的焊接质量，但由于受到钨极许用电流的限制，焊接电流不能用得太大。一般情况下，不开坡口对接钨极氩弧焊时，可以焊透厚度小于 3mm 的母材，超过此厚度的焊件如要全焊透，需对母材开坡口。由于钨极氩弧焊焊接速度慢，导致焊接变形增加、焊接接头抗腐蚀性能下降，而且钨极氩弧焊焊接时产生一定量的放射线对人体有一定的损害，因此焊接中、厚板奥氏体不锈钢时已不能很好的满足实际生产的需求。

熔化极气体保护焊用焊丝作为电极（和填充金属），焊接电流可以大大提高。由于熔深大，焊丝熔敷速度快，提高了生产效率，改善了劳动条件，减少了焊接变形，同时还有利于提高焊接接头耐腐蚀性能。熔化极气体保护焊适用于中等和大厚度母材的焊接。

熔化极气体保护焊，是用可熔化的焊丝与被焊工件之间的电弧作为热源来熔化焊丝和母材金属，并向焊接区输送保护气体，使电弧、熔化的焊丝、熔池及附近金属免受周围空气的有害作用，通过连续送进焊丝不断熔化并过渡到熔池，形成焊缝金属。熔化极气体保护焊焊接奥氏体型不锈钢时的熔滴过渡有滴状过渡、短路过渡和喷射过渡 3 种。其中滴状过渡时，熔滴直径比焊丝直径大，飞溅较大，导致焊接过程不稳定，在生产上极少使用。短路过渡电弧间隙小，电弧电压较低，电弧功率比较小，适用于薄板焊接。生产中应用最为广泛的是喷射过渡，对于一定的焊丝和保护气体，当焊接电流增大到临界电流值时（图 4-44），焊丝端头熔化的金属被压缩成笔尖状，以细小熔滴从液柱尖端高速轴向射入熔池，即喷射过渡，如图 4-45 所示。

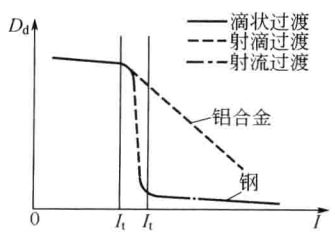


图 4-44　熔滴过渡形式随电流变化的情况
D_d—熔滴直径

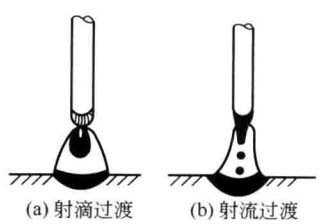
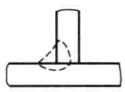


图 4-45　喷射过渡示意图

(1) 熔化极惰性气体保护焊

熔化极惰性气体保护焊的惰性气体，通常采用氩气。该焊接工艺已开始在许多领域中得到使用，其中以机械操作的纵缝焊应用最多。焊接时选择直流反极性电源，以短路过渡和喷射过渡的熔滴形式进行操作，用熔化极氩弧焊短路过渡焊接奥氏体型不锈钢的焊接参数见表 4-44，用熔化极氩弧焊喷射过渡焊接奥氏体型不锈钢的焊接参数见表 4-45。

表 4-44 熔化极氩弧焊短路过渡焊接奥氏体型不锈钢的焊接参数[1]

板厚 /mm	接头形式	焊丝直径 /mm	焊接电流 /A	电弧电压 /V	焊接速度 /(cm/min)	送丝速度 /(cm/min)	气体流量 /(L/min)
1.6		0.8	85	15	42.5～47.5	460	15
2.0			90		32.5～37.5	480	
1.6			85		37.5～52.5	460	
2.0			90		28.5～31.5	480	

在熔化极氩气保护焊的基础上加入脉冲电流即成脉冲熔化极氩弧焊，它不仅具有熔化极氩气保护焊的所有特点，同时能控制焊接热输入，控制金属熔池，使焊缝正反面成形良好，实现单面焊背面成形。表 4-46 为脉冲熔化极氩弧焊的单面焊背面成形对接焊缝的焊接参数。表 4-47 为脉冲熔化极氩弧焊焊接角焊缝的焊接参数。在焊接同样厚度的材料时，焊接热输入比非脉冲熔化极焊小，相应地减少了热影响区，有利于提高耐腐蚀性能；同时减少了焊接应力与变形。脉冲电流的热循环对金属熔池能起到搅拌作用，有利于细化焊缝结晶，降低产生裂纹的倾向。此外，这种焊接方法可以减轻劳动强度，提高生产效率。

(2) 熔化极混合气体保护焊

采用混合气体作为保护气体，具有下列优点。

① 可以提高熔滴过渡的稳定性。

② 稳定阴极斑点，提高电弧燃烧的稳定性。

③ 增大电弧的热功率，改善焊缝熔深形状和表面形状，使焊缝能呈圆滑过渡，焊缝的余高适中。

混合活性气体是在氩气的基础上加体积分数为 0.5%～1%的氧或加体积分数为 1%～5%的二氧化碳作为保护气体。这时，焊接过程比较稳定，焊丝端部呈细熔滴过渡，焊缝成形有所改善。在生产上应用比较广泛的是在混合气体保护下的脉冲焊接工艺。奥氏体型不锈钢的熔化极气体保护一般采用细焊丝，焊丝熔化速度很快，电弧热量集中。为了保证焊缝外表和内在质量，用手工操作焊不太可能达到这一目的，广泛应用的还是机械操作脉冲熔化极气体保护焊。

焊接电源一般采用平特性，为直流正接连接。采用脉冲焊时，脉冲电源为平特性，维弧电源用平特性或降特性，仍为直流正极性。用脉冲熔化极混合气体焊焊接奥氏体型不锈钢的焊接参数见表 4-48、表 4-49。

钨极和熔化极氩弧焊焊接奥氏体型不锈钢时，填充焊丝按表 2-18、表 2-19 选择。

表 4-45　用熔化极氩弧焊喷射过渡焊接奥氏体型不锈钢的焊接参数[1]

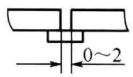
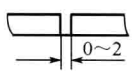
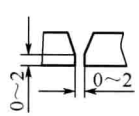
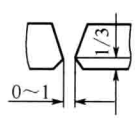
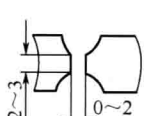
板厚 /mm	坡口尺寸 /mm	层数	焊接位置	焊丝直径 /mm	焊接电流 /A	电弧焊电压 /V	焊接速度 /(cm/min)	送丝速度 /(cm/min)	氩气流量 /(L/min)	备注
3		1	水平	1.6	200～240	22～25	40～55	350～450	14～18	永久垫板
			立		180～220	22～25	35～50	300～400		
6		2(1∶1)	水平	1.6	220～260	23～26	30～50	400～500	14～18	
			立		200～240	22～25	25～45	300～400		
12		5(4∶1) 6(5∶1)	水平	1.6	240～280	24～27	20～35	450～650	14～18	
			立		220～260	23～26	20～40	400～500		
22		11(7∶4) 14(10∶4)	水平	1.6	240～280	24～27	20～35	450～650	14～18	
			立		200～240	22～25	20～40	450～650		
38		18(9∶9) 22(11∶11)	水平	1.6	280～340	26～30	15～30	500～700	14～18	
			立		240～300	24～28	15～30	450～700	18～22	

表 4-46　脉冲熔化极氩弧焊焊接奥氏体型不锈钢单面焊背面成形对接焊缝的焊接参数[1]

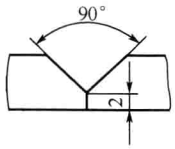
板厚 /mm	坡口尺寸 /mm	焊丝直径 /mm	脉冲电流 /A	基值电流 /A	电弧焊电压 /V	脉冲频率 /Hz	焊接速度 /(cm/min)	焊丝伸出长度 /mm	氩气流量 /(L/min)
4		1.4	130～140	30	24	50	36	10	6/10
5		1.4	180	30	25	100	40～42	12	6/9
6		1.4	210	20	26	100	29	12	5/9
		1.6	160～180	50～55	26	50	25	12	9/16

表 4-47　脉冲熔化极氩弧焊焊接奥氏体型不锈钢角焊缝的焊接参数[9]

板厚/mm	焊脚尺寸/mm	焊接位置	焊丝直径 /mm	焊丝伸出长度 /mm	焊接平均电流 /A	电弧电压 /V	氩气流量 /(L/min)	焊接方向
1.5～2.0	2～3	平焊	1.2	8～12	65～130	18～20.5	10～12	自上向下
		立焊	1.2	8～12	60～100	18～19.0	10～12	
		仰焊	1.2	8～12	60～120	18～19.0	10～12	
3	3～4	平焊	1.2～1.6	10～14	90～140	19.0～21.5	12～14	自上向下
		立焊	1.2～1.6	10～14	80～110	18.5～19.5	12～14	
		仰焊	1.2～1.6	10～14	90～130	18.5～19.5	12～14	
4	4	平焊	1.6	14～17	130～170	19.6～22	14～16	自上向下
		立焊	1.6	14～17	120～140	19～20	14～16	
		仰焊	1.6	14～17	130～160	19～20	14～16	
5～6	5	平焊	1.6～2.0	16～20	160～210	20.0～22.5	16～18	自上向下
		立焊	1.6～2.0	16～20	140～160	19.0～20.5	16～18	
		仰焊	1.6～2.0	16～20	140～160	19.5～20.5	16～18	
7～8	5～6	平焊	2.0	18～22	200～280	20.5～23.0	18～20	自上向下
		立焊	2.0	18～22	150～180	20.0～21.0	18～20	
		仰焊	2.0	18～20	180～250	19.5～20.5	18～20	

注：脉冲频率 50Hz。

表 4-48　脉冲熔化极混合气体焊焊接奥氏体型不锈钢的焊接参数（一）[9]

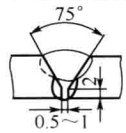
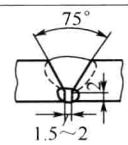
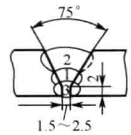
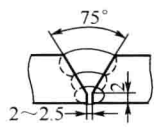
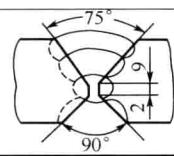
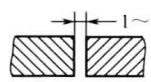
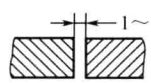
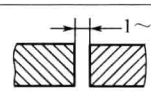
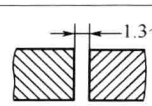
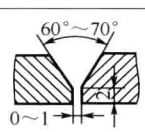
板厚/mm	接头形式	焊丝直径/mm	脉冲频率/Hz	平均焊接电流/A	电弧电压/V	气体流量		力学性能	
						Ar/(L/min)	O_2/(mL/min)	σ_b/MPa	弯曲角度/(°)
4		1.6	50	140 140	24 24	25	250	>600	180
6		1.6	100	200 210	28 28	25	250	>600	180
6		1.6	100	180～190 200～210 200	26～27 27～28 28～29	25	250	>600	180
8		1.6	100	210 220～230 200～210	26～27 27～28 28～29	25	250	>600	180
16		1.6	100	230 240 250 260	29 30 31 31	25	30	>600	180

表 4-49　脉冲熔化极混合气体焊焊接奥氏体型不锈钢的焊接参数（二）[1]

板厚/mm	接头形式	焊接电流/A		电弧电压/V	焊接速度/(cm/min)	送丝速度/(cm/min)	气体流量/(L/min)		备注
		脉冲电流	基值电流				Ar	CO_2	
3		150～170	50	24	65	550	17	0.15～0.25	单面焊 1 层
4		180	60	24	65	700	17	0.2	单面焊 1 层
5		200～220	50～60	24	65	800	17	0.2～0.5	单面焊 1 层
8		200	60	24～26	58	800	17	0.2	双面焊（正反各 1 层）
8		200	60	24	65 46	700	17	0.2	单面焊(2 层)

注：双面焊焊缝，第一层焊缝不清根，直接焊接第二层；脉冲频率 50Hz。

（3）药芯焊丝电弧焊

药芯焊丝电弧焊是依靠药芯焊丝在高温时，反应形成的熔渣和气体联合自行保护焊接区进行焊接的方法，也有外加保护气体的。它与普通熔化极气体电弧焊一样，是以熔化的药芯焊丝作为一个电极，母材金属作为另一个电极，在两极间燃烧电弧进行焊接。焊接奥氏体型不锈钢时，通常外加 CO_2 气体来保护药芯焊丝、熔池和母材金属。与普通熔化极气体保护焊的主要区别在于不用实心焊丝而用内部装有焊剂混合物的药芯焊丝。焊接时，在电弧热的作用下，熔化状态的焊剂材料、焊丝金属、母材金属和保护气体相互之间发生冶金作用，同时形成一层较薄的液态熔渣包覆熔滴并覆盖熔池，对熔池金属形成又一层保护。实质上这种焊接方法是一种气渣联合保护的方法，如图 4-46 所示。

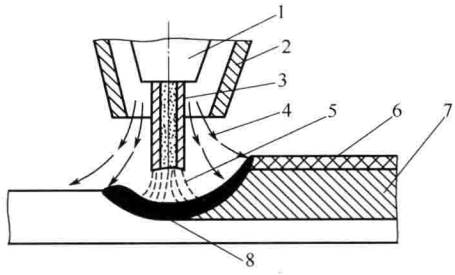


图 4-46　药芯焊丝气体保护电弧焊示意图
1—导电嘴；2—喷嘴；3—药芯焊丝；4—CO_2气体；5—电弧；6—熔渣；7—焊缝；8—熔池

药芯焊丝气体保护焊综合了焊条电弧焊和熔化极气体保护焊的优点。其技术经济性分析如下。

① 熔敷速度（指单位电弧时间熔敷到焊缝中的金属量）快。药芯焊丝与药皮焊条相比，可使用的电流大，电流密度更大，而且其填充系数（同一段焊丝中药粉重量与金属重量的百分比，即质量分数%）小于焊条药皮涂料系数（有药皮的同一段焊条上焊条药皮重量与焊芯重量的百分比，即质量分数%），因此药芯焊丝的熔敷速度明显大于药皮焊条。

② 操作系数（指包括燃弧时间的实际焊接时间与总工时的时间之比）比较。药芯焊丝与药皮焊条相比，由于省去了更换焊条的时间，因此操作系数明显提高；与实心焊丝相比，由于需要清渣工作，所以操作系数略低于实心焊丝。

③ 材料效率（指材料在焊件上实际熔敷金属量与所用材料质量比）比较。药芯焊丝的材料效率为 78%～85%，实心焊丝高达 90%，埋弧焊的材料效率为 40%～55%，药皮焊条为 65%～70%。

④ 减少填充金属比较。由于药芯焊丝熔深较大，而且焊丝易于深入坡口底部，所以允许采用较大的坡口钝边和较小的坡口角度，减少了填充到焊缝金属的数量。

药芯焊丝与实心焊丝相比，其优越之处主要表现在芯部焊药的作用，由于药芯焊丝的芯部加有稳弧剂、造渣剂和合金剂，从而使电弧燃烧稳定，熔滴过渡平稳，克服了实心焊丝在施焊过程中的飞溅大、表面成形差等疵病；并能提高全位置焊接的适应性。另外，由于药芯焊丝可通过金属管坯和药芯两种途径过渡合金元素，有助于合金元素的调整，同时使焊缝金属力学性能特别是冲击性能得到提高，并且也使焊缝金属耐腐蚀性得到提高。

综上所述，药芯焊丝气体保护电弧焊与熔化极气体保护焊和焊条电弧焊相比，具有独有的高效率、良好的适应性和经济性。

药芯焊丝气体保护焊焊接奥氏体型不锈钢时，可采用机械化焊接，但通常使用广泛的是手工操作焊接方法。焊接设备选用普通的 CO_2 焊接设备即可，焊接电源采用直流平特性。保护气体选用 CO_2 气体；也可采用 CO_2＋Ar 混合气体，若氩气比例过高时，反而会使焊缝中形成气孔。

药芯焊丝断面结构参见本书的图 2-1。O 形断面药芯焊丝由于焊丝内部的焊剂不导电，电弧易沿钢皮旋转，当直径较大时，电弧稳定性较差，飞溅增大，焊缝成分可能出现不够均匀的现象。直径为 ϕ2.4mm 的药芯焊丝在生产上得到应用。折叠式焊丝因管坯在整个断面上分布比较均匀，药芯焊丝内部亦能导电，所以电弧燃烧稳定，焊丝熔化均匀，冶金反应充

分，容易获得优质的焊缝。直径大于 ϕ2.4mm 时应用它，更能显出这些优势。

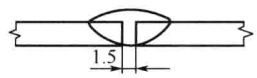
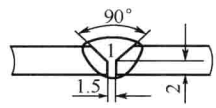
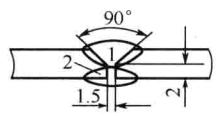
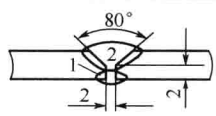
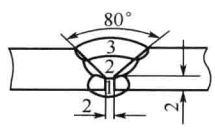
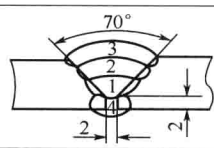
药芯焊丝气体保护焊的焊接参数主要有焊接电流、电弧电压、焊接速度、焊丝伸出长度和保护气体流量等。当其他条件不变时，焊接电流与送丝速度成正比；焊接电流变化时，电弧电压要相应的变化；采用纯 CO_2 气体保护时，通常采用长弧法焊接，焊接电流调节范围广，可达 200～700A，电弧电压为 25～35V。焊丝伸出长度太长会使电弧不稳定，飞溅过大；焊丝伸出长度过短，会造成过多的飞溅物堵塞喷嘴，使气体保护不好，焊缝中易产生气孔。通常焊丝伸出长度为 19～38mm。平焊位置时焊枪前进方向与焊件之间的倾角为 2°～15°；焊接角焊缝时为 40°～50°。如果角度太大，会降低气体保护效果。YA002-2 药芯焊丝焊接奥氏体型不锈钢的焊接参数见表 4-50，不锈钢药芯焊丝 CO_2 保护焊工艺参数见表 4-51。

表 4-50　YA002-2 药芯焊丝焊接奥氏体型不锈钢的焊接参数[1]

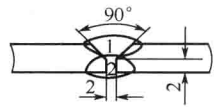
焊丝直径/mm	焊丝伸出长度/mm	电弧电压/V	焊接电流/A
1.2	10～15	26～32	100～180
1.6	13～25	26～32	150～275
2.0	20～32	26～32	200～300
2.4	25～38	26～32	225～350

注：当电弧电压调至最低限时，焊接电流也应处于最低限位置。

表 4-51　不锈钢药芯焊丝 CO_2 保护焊工艺参数

板厚/mm	焊丝直径/mm	坡口形状及焊道	焊接电流/A	焊接速度/(cm/min)	备注
1.5	0.8		80～100	70～90	铜衬垫
3.0	1.2		140～200	40～60	铜衬垫
5.0	1.6		250～300	20～50	铜衬垫
5.0	1.2		150～220	40～60	背面清根
9.0	1.6		200～300	20～60	铜衬垫
9.0	1.2		150～220	25～50	铜衬垫
12.0	1.6		200～300	20～60	背面清根

续表

板厚 /mm	焊丝直径 /mm	坡口形状及焊道	焊接电流 /A	焊接速度 /(cm/min)	备注
7.0	1.2		100～120	5～9	向上立焊，背面清根

注：母材为 SUS304［SUS304 为日本不锈钢，相当于我国的 06Cr19Ni10(0Cr18Ni9)］；焊丝为 E308T；保护气体为 CO_2，气体流量为 20L/min，道间温度小于或等于 150℃。

4.4 等离子弧焊

4.4.1 等离子弧焊工作原理及特点

等离子弧焊是借助于水冷喷嘴对电弧的拘束作用，从而获得较高能量密度的等离子弧进行焊接的方法。

等离子弧焊焊接原理见图 4-47。它利用一个特殊结构的等离子焊枪来产生等离子弧。等离子弧在焊枪内外受到机械压缩、热收缩和磁收缩，弧柱断面被压缩得较小，形成一个高电流密度、高能量密度、高温度的电离化程度很高的弧柱。利用这种电弧熔化金属进行焊接，可获得质量较高的焊接接头。焊枪中的钨极处于喷嘴的中心位置，形成电弧等离子体的是氩气，外层的保护气体可用氩气，也可用氢＋氩混合气。等离子弧焊接的电弧能量比切割用的等离子弧要低，离子流的速度也低。焊接奥氏体型不锈钢对接焊缝时，用微弧等离子焊，最薄件厚度仅为 0.01mm，用大电流等离子弧焊可一道焊成的最大厚度可达 8mm。

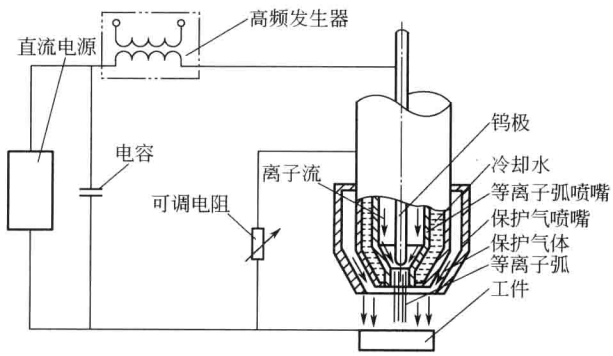


图 4-47 等离子弧焊焊接原理

等离子弧焊接与钨极氩弧焊相比具有下列特点。

① 电弧能量集中且温度高，焊接过程中电弧稳定，焊接速度快，可以缩小焊接接头热影响区且焊接变形小，还能提高焊缝内在和外部质量，使焊接接头力学性能和耐腐蚀性能均优于钨极氩弧焊。

② 电弧呈圆柱形且挺直性好，弧长变化对焊件表面加热点的能量密度影响小，不会由于弧长的改变而影响焊缝成形。等离子弧焊喷嘴到焊件之间的距离高达 6.4mm 时，弧柱仍

不会漂移。

③ 当焊接电流小到 0.1A 时，电弧仍能稳定燃烧，并保持良好的挺度和方向性。

④ 钨极缩于喷嘴内，可减少钨极对焊缝的污染。

⑤ 穿透性等离子弧焊接时，焊件不开坡口，背面无衬垫，可实现单面焊双面成形。但此时不适宜手工操作，灵活性不如手工钨极氩弧焊。

⑥ 设备较复杂，工艺参数因素多，匹配要求较严格，喷嘴使用寿命较短且气体耗量较大，只宜在室内焊接。

4.4.2　等离子弧焊分类及焊接参数

等离子弧焊有手工操作和机械化操作之分；也有不加填充焊丝与加填充焊丝之分。等离子弧焊按焊缝成形机理，可分为以下几种。

(1) 大电流等离子弧焊

大电流等离子弧焊分穿透型和熔透型两种方法。

① 穿透型等离子弧焊。它是以电弧在熔池前穿透工件形成小孔，随着热源移动在小孔后形成焊道的一种焊接方法，又称穿孔焊或锁孔焊。

在焊接厚度大于 2.0mm 以上的奥氏体型不锈钢焊件时，利用高温等离子弧将焊件待焊处加热熔化至烧穿，如果焊接规范参数调节适当，可以穿透工件形成小孔。此小孔面积较小，熔化金属靠表面张力托住而不至于从小孔中跌落，这就是等离子弧焊小孔效应。在焊接厚为 2.5～8.0mm 的奥氏体型不锈钢时，可以不开坡口，不留间隙或留间隙小于 0.5mm，依靠小孔效应实现单面焊双面成形。这种焊接方法，目前只适用于平焊位置对接焊。待焊处的正、反两面均通以保护气体，收弧时要填满小孔。填满小孔主要靠焊接电流和离子流气流同时衰减或先后衰减，才能消除弧坑和下凹坑。

② 熔透型等离子弧焊。它是指这种等离子弧在焊接过程中只熔化焊件而不产生小孔效应，焊缝成形机理与钨极氩弧焊类似。有人又称这种方法为熔入式或熔融法等离子弧焊。

这种焊接方法主要用于薄件单面焊背面成形的焊缝或者厚件的多层焊。

大电流等离子弧焊接时，焊接参数比钨极氩弧焊多，焊接参数除了焊接电流、电弧电压外，还有等离子气流、保护气体的成分、气体流量、喷嘴形状和孔径、长度以及喷嘴到焊件的距离等。其中焊接电流、焊接速度和等离子气体流量的匹配尤为重要，直接影响焊接接头的成形和焊缝表面的质量。

穿透型等离子弧焊接奥氏体型不锈钢的焊接参数见表 4-52。熔透型等离子弧焊接奥氏体型不锈钢的焊接参数见表 4-53。

表 4-52　穿透型等离子弧焊接奥氏体型不锈钢的焊接参数[1]

板厚/mm	接头形式	焊接电流/A	电弧电压/V	焊接速度/(cm/min)	气体成分(体积分数)	气体流量/(L/min)	
						离子气	保护气体
2.4	I形对接	115	30	61	Ar95%＋$H_2$5%	2.8	17
3.2		145	32	76		4.7	17
4.8		165	36	41		6.1	21
6.4		240	38	36		8.5	24

注：1. 焊接电源及极性为直流正接。

2. 焊缝背面须用气体保护。

表 4-53 熔透型等离子弧焊接奥氏体型不锈钢的焊接参数[1]

板厚 /mm	焊接电流 /A	电弧电压 /V	焊接速度 /(cm/min)	离子气 Ar /(L/min)	保护气体 /(L/min)	喷嘴直径 /mm	备注
0.025	0.3	—	12.7	0.2	8(Ar99%+$H_2$1%)	0.75	卷边焊
0.075	1.6	—	15.2	0.2	8(Ar99%+$H_2$1%)	0.75	
0.125	1.6	—	37.5	0.28	7(Ar99%+$H_2$0.5%)	0.75	
0.175	3.2	—	77.5	0.28	9.5(Ar99%+$H_2$4%)	0.75	
0.25	5	20	32.0	0.5	7Ar	0.6	
0.2	4.3	25	—	0.4	5Ar	0.8	对接焊（背面有铜垫）
0.2	4	26	—	0.4	6Ar	0.8	
0.1	3.3	24	37.0	0.15	4Ar	0.6	
0.25	6.6	24	27.0	0.6	6Ar	0.8	
1.0	2.7	25	27.5	0.6	11Ar	1.2	对接焊（背面有铜垫）
0.25	6	—	20.0	0.28	9.5(Ar99%+$H_2$1%)	0.75	
0.75	10	—	12.5	0.28	9.5(Ar99%+$H_2$1%)	0.75	
1.2	13	—	15.0	0.42	7(Ar99%+$H_2$2%)	0.8	
1.6	46	—	25.4	0.47	12(Ar99%+$H_2$5%)	1.3	手工对接
2.4	90	—	20.0	0.7	12(Ar99%+$H_2$5%)	2.2	
3.2	100	—	25.4	0.7	12(Ar99%+$H_2$5%)	2.2	

注：保护气体分数均为体积分数。

（2）微束等离子弧焊及脉冲等离子弧焊

焊接电流小于 30A 的熔透型等离子弧焊称为微束等离子弧焊。20 世纪 70 年代以来，开始用小电流等离子弧焊接超薄件和细钢丝等，焊接电流可小到 0.2A，焊接奥氏体型不锈钢件最薄的厚度可达 0.01mm。微束等离子弧焊接的特点是通过电弧的压缩，导电弧柱集中为一条细线，虽然焊接电流很小，电弧仍十分稳定，熔池很小，热影响区很窄，它不利用小孔效应，就能够对超薄件实现快速焊接。

与大电流等离子弧焊一样，微束等离子电弧也是靠水冷式焊枪（即等离子弧发生器）产生的。焊枪是个关键部件。电极和喷嘴的孔径都很细小，所用离子气流较小，一般均用纯氩。焊接奥氏体型不锈钢时，保护气体用氩加氢（H_2 为 1%～8%）的混合气体，这对防止金属的氧化有很好的效果，同时也提高了热效率，并使弧柱收缩得更细。

微束等离子弧焊可以采用手工操作，但为了保证焊接接头的质量，应尽可能地采用机械操作。厚度小于 0.8mm 的焊接接头设计与装配要求见图 4-48 和表 4-54。表 4-55 为微束等离子弧焊接奥氏体型不锈钢的焊接参数，仅供参考。

表 4-54 厚度小于 0.8mm 的焊接接头装配要求[1]

接头形式	间隙 b 不大于	错边量 B 不大于	压板间距 C	衬垫槽宽 D
平对接	0.2δ	0.4δ	$(10\sim20)\delta$	$(4\sim16)\delta$
卷边对接	0.6δ	1δ	$(15\sim30)\delta$	$(10\sim24)\delta$
端接	δ	3δ	—	—

注：δ 为板厚。

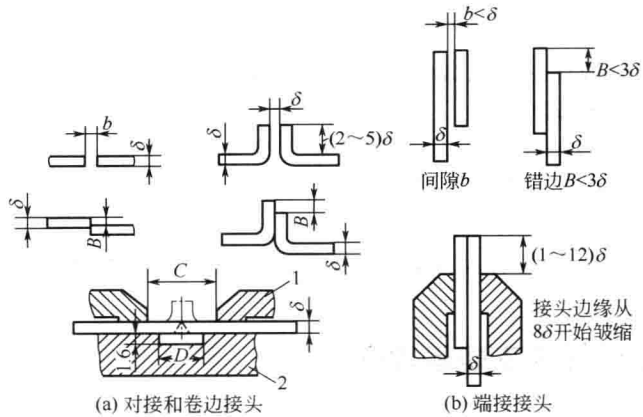


图 4-48　厚度小于 0.8mm 的焊接接头设计

1—压板；2—垫板

表 4-55　微束等离子弧焊接奥氏体型不锈钢的焊接参数[1]

板厚 /mm	接头形式	焊接电流 /A	电弧电压 /V	焊接速度 /(mm/min)	离子气 Ar /(L/min)	保护气体 Ar96%＋$H_2$4% /(L/min)	喷嘴直径 /mm
0.1	I 形对接	3.3	24	370	0.15	4	0.6
0.25		6.5	24	270	0.60	6	0.8
0.5		18.0	24	300	0.60	11	1.0
1.0		27.0	25	275	0.60	11	1.2

微束等离子弧焊接的接头，其抗腐蚀性能好。

为了使焊接薄壁件及超薄壁件的质量更有保证，目前发展到采用脉冲等离子弧焊接。它与前面所述的脉冲气体保护焊一样，可以调节基值电流、脉冲电流、脉冲宽度和频率等工艺参数。

4.5 不锈钢焊接的工程实例

4.5.1 埋弧焊焊接 30m³ 奥氏体不锈钢发酵罐[11]

(1) 技术条件

材料为 0Cr18Ni9Ti，厚度为 10mm；筒体直径为 2400mm，长度为 9896mm；工作压力为 0.25MPa，工作介质为发酵液蒸气；工作温度为 145℃。

(2) 焊接规范

采用 I 形坡口，坡口间隙为 4mm，坡口及两侧 50mm 范围内及焊丝应清理干净，不得有油污及杂质；焊丝为 H0Cr21Ni10，焊丝直径为 ϕ4.0mm；焊剂为 HJ260，焊剂烘焙温度为 250℃，保温 2h；电源与极性为直流反接；焊接参数见表 4-56。

表 4-56　30m³ 奥氏体不锈钢发酵罐 SAW 焊接参数[11]

正面焊缝			背面焊缝		
焊接电流/A	电弧电压/V	焊接速度/(cm/min)	焊接电流/A	电弧电压/V	焊接速度/(cm/min)
550	29	70	600	30	60

为防止475℃脆化及σ脆性相析出，焊接过程中，采用反面吹风及正面水冷的措施，快速冷却焊缝。

产品和产品焊接试板焊后进行焊缝外观检查，外观合格后对产品A类、B类接头20%的X射线检测，产品焊接试板进行100%的X射线检测，且射线底片透照质量不低于AB级，接头质量符合JB 4730—1994《压力容器无损检测》Ⅱ级要求。同时对现场施焊工艺进行检查；对产品焊接试板进行力学性能试验，合格后进行整体水压试验（水的氯离子含量不大于25mg/L），试验压力为0.31MPa。

注：JB 4730—1994《压力容器无损检测》标准现已改为JB/T 4730—2005《承压种设备无损检测》。

4.5.2 钨极氩弧焊焊接不锈钢薄壁管[1]

国内外不锈钢波纹管的管坯均是有缝或无缝不锈钢薄壁管，其中大部分是焊接而成的有缝薄壁管。有缝不锈钢薄壁管加工过程是：钢带下料→卷圆→纵缝对接焊→整形成有缝管坯，最后挤压成形为波纹部分。波纹管壁厚为0.2～0.6mm材料为18-8型不锈钢，对管坯的纵焊缝要求很高，首先要求单面焊双面成形为一次性焊透焊缝，不允许焊缝出现裂纹、未熔合、焊穿、未焊透和咬边等缺欠；其次要求焊缝平直、焊缝余高不大且均匀一致，焊缝要圆滑过渡。只有这样，才能避免管坯挤压成波纹形状时由于应力集中而使压波处开裂，或者在进行金属软管强度、密封性或疲劳性考核过程中发生泄漏现象。对某些要求严格的波纹管，在焊接管坯的生产线上还要对纵焊缝质量进行在线检测，筛选。在确保管坯焊缝内外质量优异的前提下，才允许挤压成波纹形状。有时，无缝管坯或有缝管坯（指波纹管两端的直线端），还要进行环缝对接焊。

（1）纵缝的钨极氩弧焊

不锈钢波纹管坯纵缝的焊接通常在专用钨极氩弧焊机上进行，最长可焊2000mm，管内径从ϕ6～200mm不等；也可以在专用生产线上连续焊接，不受焊缝长度限制。专用钨极氩弧焊焊接纵缝的设备，是由焊接电源、行走小车（带动焊枪自动移动）、气动夹具和电气控制部分组成。薄壁管环缝对接焊，应在气胎夹具上进行，如图4-49所示。

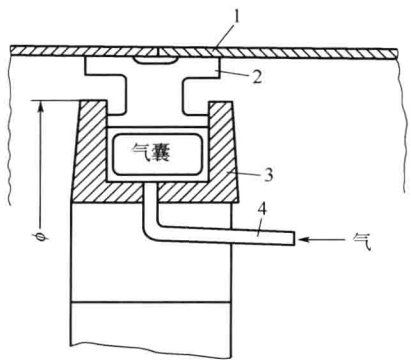


图4-49 气胎夹具示意图
1—焊件（圆管）；2—垫块；3—气囊框；4—进气管

为了保证焊接区域有一个良好的散热条件，便于控制熔池的热量，琴键式压块和垫板的材料应选用纯铜。在焊接过程中，由于热应力作用，已成焊缝部分将会产生收缩，造成待焊前方发生搭边现象。气动夹具的另一个作用是产生的压紧力，可将焊件牢牢地压紧在垫板上，对焊件产生拘束作用，防止或大大减少收缩变形。如果拘束应力过大，而气动夹具尚有一定的柔性，可允许焊缝有微量收缩，以免拘束应力过大而产生裂纹。使用气动夹具可使焊后工件形状保持规则，焊后变形量也能得到控制。

纵缝焊接时，要严格控制板材的下料尺寸，板材下料要保持平直，切口要与板边保持垂直，不能偏斜；切口处不允许有毛刺存在，待焊处要保持干净，不允许有任何油污和杂物。

管的卷圆装配尺寸要严格控制，对于厚为0.4mm的薄板装配时，局部间隙不得超过0.08mm，否则在施焊过程中会出现焊穿或使焊缝无法成形。

纵缝的焊接参数见表4-57，表中待焊板材为18-8型不锈钢，不加填充焊丝进行施焊。

表 4-57　用钨极氩弧焊焊接 18-8 型不锈钢纵缝的焊接参数

接头形式	材料厚度/mm	卷边高度/mm	钨极直径/mm	焊接电流/A	电弧电压/V	电弧高度/mm	焊接速度/(m/h)	氩气流量/(L/min)	
								外	内
对接	0.4	—	1	36～40	—	0.5	40	7	7
卷边对接	0.2	0.35～0.4	1	9～11	8～10	—	20	5	5
	0.3	0.4～0.45	1	16～18	8～10	—	20	6	6

（2）环缝的钨极氩弧焊

对对接环缝的待焊处与纵缝对焊件要求一样严格，要求待焊两管端面直径要一致，两端待焊处不允许有毛刺和飞边现象。两端待焊处对口间隙，对于不加填充焊丝的焊缝，与焊纵缝时相同；对于加填充焊丝的焊缝，局部间隙应小于 0.2mm。

4.5.3　钨极旋转氩弧焊焊接不锈钢导管[1]

某产品采用不同规格的小口径导管（壁厚 1～2mm）。不锈钢导管与球头接嘴进行对接焊，材质为 1Cr18Ni9Ti。要求焊缝具有致密、耐高压、耐高温和耐腐蚀性能。以往导管焊接均采用手工钨极氩弧焊，但焊缝内部易出现未焊透、夹钨及气孔等缺陷，影响导管焊接质量的稳定性。为了确保导管焊接质量，采用了进口的机械化钨极旋转氩弧焊机。

该设备由焊接电源和焊接机头两部分组成。电源部分具有脉冲电流和程序控制的功能，可以调节和控制焊接速度、焊接电流、焊接时间以及保护气体提前和滞后流通时间等参数。施焊前，将钢管与钢管或钢管与球头接嘴装夹固定在焊接机头中，焊接机头上装有钨极，焊接机头能自动沿待焊处做 360°圆周旋转并进行焊接。施焊时不加填充焊丝，靠待焊处金属自行熔化，实现单面焊背面成形的工艺。该设备操作方便，稳定性好，再现性好，适用于不同小口径导管的对接焊。

施焊过程中不加填充焊丝，要达到导管焊接单面焊背面成形的目的，具有一定的难度。

首先对导管装配有独特的要求。

① 要求导管两端和球头接嘴均需经过机械加工，两者壁厚要均匀一致。

② 焊接端面应垂直，导管与球头接嘴的中心为一直线，位移量不能超过 0.3mm，否则将直接影响导管焊缝成形，通常用芯棒来保证。

③ 导管待焊端面和球头接嘴待焊处都不允许有倒角加工面，不然焊缝厚度达不到要求，直接影响焊接接头的力学性能。

④ 对装配间隙有严格要求，装配间隙不大于 0.1mm 时，可以获得优质的焊缝；若间隙达到或超过 0.15mm 时，将出现未焊透的缺陷。

焊接参数对焊接质量的影响颇大，其中峰值电流在每个焊接区域（导管固定不动，焊接分上、下、左、右 4 个区）的变化值、引弧间隙、气体流量、钨极直径等参数变化的影响较为突出。经过一系列的焊接工艺试验得出如表 4-58 所示的数值。

表 4-58　用旋转钨极氩弧焊焊接不同规格的导管的焊接参数

管径/mm / 焊接参数	ϕ6×1.0	ϕ8×1.0	ϕ6×2.0	ϕ10×1.0	ϕ12×1.5	ϕ14×1.5	ϕ16×1.5
预给气时间/s	20	30	30	30	30	30	30
滞后时间/s	20	30	30	30	30	30	30
维弧电流/A	12	13	26	13	20	20	20

续表

焊接参数 \ 管径/mm		φ6×1.0	φ8×1.0	φ6×2.0	φ10×1.0	φ12×1.5	φ14×1.5	φ16×1.5
维持时间/s		0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2
峰值时间/s		0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2
峰值电流/A	Ⅰ	40～42	36～38	80～92	39～41	58～60	58～60	59～61
	Ⅱ	40～42	29～31	63～65	36～38	52～54	55～57	56～58
	Ⅲ	27～29	20～22	45～47	31～33	41～43	46～48	51～53
	Ⅳ	23～25	18～20	40～42	36～38	37～39	41～43	46～48
焊接时间/s	Ⅰ	3	4	4	4	5	6	7
	Ⅱ	2	4	4	5	6	7	7
	Ⅲ	2	4	4	5	6	7	8
	Ⅳ	2	3	3	4	5	6	7
衰减时间/s		5	3	5	5	5	5	5
起弧停留时间/s		1.2	5	2	1.5	2	2	2
转速/(r/min)		8.5	5.1	5.1	4.1	3.4	2.9	2.5
焊头保护气流量/(L/min)		14～16	15～20	15～20	15～20	15～20	15～20	15～20
管内保护气流量/(L/min)		2～3	2～3	2～3	2～3	2～3	2～3	2～3
引弧间隙/mm		0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
钨极直径/mm		φ1.6	φ1.6	φ1.6	φ1.6	φ1.6	φ1.6	φ1.6

用表中数据焊接了数百根导管焊接接头，经X射线检测，没有发现裂纹、未熔合、未焊透等缺陷，X射线检测底片按QJ1842—95中Ⅰ级评定，合格率为99.4%。对焊接接头、一次补焊和二次补焊的焊接接头进行了抗拉强度试验，见表4-59。从表中可以看出，焊接接头抗拉强度值均超过母材金属抗拉强度下限值（560MPa）。对焊接接头进行了晶间腐蚀试验，按GB 4334.5《不锈钢硫酸-硫酸铜腐蚀试验方法》进行考核，全部通过。

表4-59 φ6mm×1.0mm导管钨极机械化旋转氩弧焊焊接接头的抗拉强度

状态	抗拉强度/MPa	断裂部位
钨极自动旋转氩弧焊一次焊成	570～650（630）	90%在熔合线处断裂 10%在基体上断裂
一次补焊	595～640（630）	全部在熔合线处断裂
二次补焊	580～625（604）	全部在熔合线处断裂

注：括号内的抗拉强度数字表示原来的强度。

综上所述，用钨极自动旋转氩弧焊焊接的1Cr18Ni9Ti不锈钢导管焊接接头，无论焊缝外观质量还是焊缝内部质量均优于手工钨极氩弧焊，在产品上得到广泛应用。

4.5.4 不锈钢管路环缝内保护装置及焊接工艺[1]

在施工现场安装过程中经常遇到许多不锈钢钢管（壁厚大于或等于2.0mm）需要拼接，

只好在现场进行装配焊接。为了保证管内焊缝不被氧化，管内要通保护气体（氩气），故需要一套充氩装置，如图 4-50 所示。两堵板之间的距离约为 200mm，中间用一根镀锌钢管串通作为通入保护气体的管路。在通气管路上对应于管道待焊部位钻几个小孔，作为保护气体的出气孔，以对准待焊处输送保护气，使待焊钢管内两堵板之间充满保护气体。在一个堵板上钻一些小孔，作为两堵板之间排气用。堵板装置的示意图如图 4-50 所示，其中钢板厚为 2mm，橡胶板不宜太厚，以管路焊接完毕后能方便地从管内将充氩装置抽出为宜。

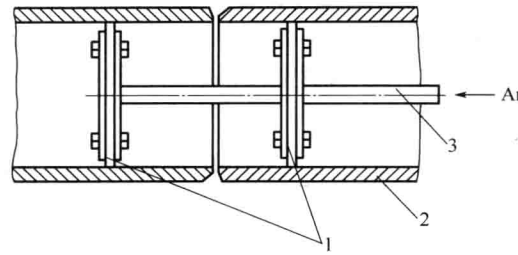


图 4-50　管内充氩装置

1—耐热橡胶堵板；2—工件；3—输送氩气管

利用这一管内充氩装置，焊成了大量不同管径的不锈钢管路，所有对接焊缝均经 X 射线检测合格和水压强度试验合格。曾解剖过管路焊接接头，管内焊缝无氧化颜色，呈银白色或金黄色，说明管内气保护效果良好。

ϕ168mm×4mm 的 1Cr18Ni9Ti 管路对接焊的焊接参数见表 4-60。

表 4-60　ϕ168mm×4mm 的 1Cr18Ni9Ti 管路对接焊的焊接参数

接头形式	焊接层次	焊接电流/A	电弧电压/V	氩气流量/(L/min)	
				焊枪	管内
60° 0.5~2.0 ≥10	打底焊	95～100	12～14	10～12	≥12
	盖面焊	100～105	12～15	10～12	≥12

4.5.5　熔化极混合气体保护焊焊接中、厚不锈钢钢板[1]

某厂腈纶设备 HS901 DMF 蒸馏塔体，用厚为 10mm、20～25mm 0Cr19Ni9 不锈钢板焊成，其塔体纵、环焊缝均采用手工操作混合气体保护焊顺利地完成。

焊接设备选用瑞典 A10-500 气体保护焊机。

保护气体采用 Ar+O_2 混合气体（Ar98%+$O_2$2%），与纯 Ar 焊接相比，它能使熔融金属表面维持表面张力小；电弧的电子发射能力强且有稳定的含氧原子层，电弧阴极斑点稳定，喷射过渡稳定、飞溅很小，焊缝能平缓过渡，焊缝成形美观。

焊丝选用瑞典 ESAB 公司生产的气体保护焊焊丝 OK16.12（其化学成分的质量分数为：C≤0.025%；Si 0.4%；Mn 1.6%；Cr 20%；Ni 10%），相当于我国惰性气体保护焊用焊丝（GB 4223—84）牌号 H00Cr21Ni10，焊丝直径为 1.2mm。

焊接参数的选择：

① 焊接电流要大于临界电流（160A），进行射流过渡才能使焊接过程稳定。若焊接电流过大，使细滴状射流过渡变为旋转射流过渡，反使焊缝成形恶化，飞溅增多，空气易被卷入熔池而产生气孔；而焊接电流小于临界电流，则会产生未焊透和未熔合等缺欠。

② 气体流量的选择要考虑工况条件，如果在室内或无风露天作业，气体流量选用 14～16L/min；对于有微风的作业环境，气体流量要增大到 18～20L/min。

③ 焊丝伸出长度的原则为焊丝直径的 10～15 倍，一般取 12～14mm。

④ 焊枪在施焊过程中应前倾 10°～15°，最好采用左向焊，喷嘴不要挡住焊工视线，这

样不易焊偏，熔池受到电弧的冲刷作用也小，可得到较大的熔宽，使焊缝成形平缓、美观。用手工钨极氩弧焊时，焊枪可做适当的横向摆动。

⑤ 要采用引弧板和收弧板，其材质、板厚、坡口尺寸要与产品相同。

在生产实践中，对于厚为 10mm 的 0Cr19Ni9 不锈钢板可实现单面焊双面成形，其焊接参数见表 4-61。从表中可以看出，随着间隙 b 减少，为了保证焊透，焊接电流要适当加大才能满足要求。

表 4-61 熔化极混合气体保护焊焊接不锈钢的焊接参数

接头形式	间隙 b /mm	钝边 p /mm	焊接层次	焊接电流 /A	焊接速度 /(cm/min)	气体流量 /(L/mm)
60°～70° b	0～0.5	0～0.5	打底	180～190	23～27	15～16
			盖面	190～200		
	0.5～1.5	0.5～1.5	打底	170～180		
			盖面	190～200		
	1.5～2.0	1.5～2.0	打底	160～170		
			盖面	190～200		

对于厚度 22mm 的 0Cr19Ni9 不锈钢板，焊接参数见表 4-57。它与 10mm 0Cr19Ni9 不锈钢板焊接相比，在打底焊时采用混合气体保护焊，而盖面焊选用埋弧焊。与单独用埋弧焊相比有下述优点：从图 4-51 中可以看出，当埋弧焊焊完第 1、2 层焊缝后，必须清根；用碳弧气刨清根后，还要用风动砂轮打磨露出金属光泽后才能进行第 3～4 层焊缝的焊接。当采用熔化极混合气体保护焊进行打底焊，然后再用埋弧焊进行盖面焊（见图 4-52）时，不需要清根，可大大减轻劳动强度。

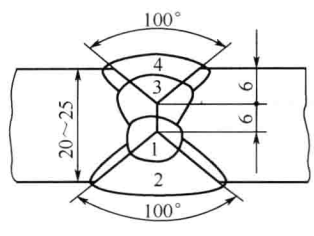


图 4-51 埋弧焊焊缝

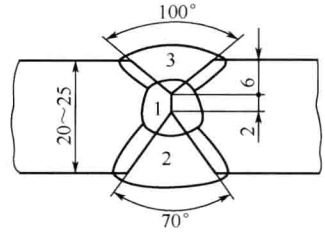


图 4-52 GMAW＋SWA 焊缝

1—混合气体保护焊焊缝；

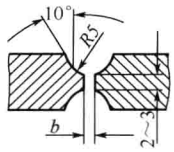
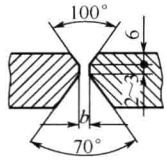
2,3—埋弧焊焊缝

用手工操作熔化极混合气体焊接的 22mm 厚不锈钢焊接参数见表 4-62。

表 4-62 熔化极混合气体保护焊焊接 22mm 厚不锈钢的焊接参数

接头形式	间隙 b/mm	焊接工艺特点	焊接电流 /A	焊接速度 /(cm/min)	气体流量 /(L/min)
70° b 70° 2～3	0～0.5	①正面 MAG 打底	230～240	23～27	15～16
		②背面埋弧焊封底焊两层			
		③正面埋弧盖面	190～200	23～27	15～16
	2.0～3.0	①双面 MAG 打底			
		②埋弧盖面			

续表

接头形式	间隙 b/mm	焊接工艺特点	焊接电流/A	焊接速度/(cm/min)	气体流量/(L/min)
	0～0.5	①正面 MAG 打底埋弧盖面	230～240	23～27	15～16
		②背面 MAG 打底埋弧盖面	230～240		
	2.0～3.0	①双面 MAG 打底	230～240		
		②埋弧盖面			
	0～0.5	①正面 MAG 打底埋弧盖面	230～240	23～27	15～16
		②背面埋弧封底			

4.5.6　埋弧焊焊接中厚不锈钢钢板[1]

CO_2 液态低温容器槽车，是由外容器和内容器组成。内容器材质为 1Cr18Ni9Ti 不锈钢，壁厚 16mm。内容器外形尺寸：直径 ϕ1600mm，长为 5786mm，容积为 11mm^3。除进行外观目视检查外，还必须对焊缝进行 100%的渗透检测和 100%的射线检测。内容器还要进行 2.88MPa 干燥无油压缩空气试验和氦质谱真空检漏，漏气率不大于 2×10^{-5}Pa·L/s。焊接工艺：所有纵焊缝和环焊缝（除一端封头与筒体环焊缝外）均采用埋弧焊，焊机型号为 MZ-1000 型，采用直流反极性电源。焊丝牌号为 H0Cr20Ni10Ti，直径为 4mm，焊剂为 HJ260。

（1）纵缝埋弧焊

钢板放在刨边机上按图 4-53 进行坡口加工，待焊钢板放在门式焊接夹具上进行装配，待焊处清除油污后进行焊接，焊接参数见表 4-58。焊好第 1、2 层焊缝后进行清根，先用碳弧气刨，然后用风动砂轮清理打磨出金属光泽，并保证清根后凹槽尺寸均匀一致，然后焊接第 3 层焊缝。

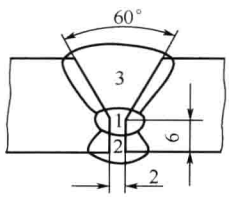


图 4-53　坡口形式及焊接层次

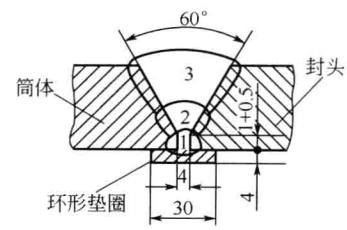


图 4-54　采用 GTAW+SMAW+SAW 焊接

1—钨极氩弧焊；2—焊条电弧焊；3—埋弧焊

（2）环缝埋弧焊

环缝埋弧焊接包括筒节与筒节和筒节与一端封头的环缝焊接。将焊好的筒节、封头放在焊接滚轮架（见图 4-14）上进行装配，用焊条电弧焊进行定位焊，在平台式焊接操作机（见图 4-15）上进行环缝焊接，先焊内焊缝（第 1、2 层），然后按纵缝焊工艺进行清根，再焊第 3 层焊缝，焊接参数可参考表 4-63。

表 4-63 用埋弧焊 16mm 厚的 1Cr18Ni9Ti 钢板纵缝的焊接参数

焊接层数/层	焊丝直径/mm	焊接电流/A	电弧电压/V	焊接速度/(mm/min)
1	4	460～480	36～38	460～480
2	4	480～500	38～39	460～480
3	4	520～560	38～39	420～440

上述纵、环焊缝焊接完毕，先进行目视检查，然后进行 100%渗透检测，排除焊缝表面缺陷后，再进行 100%射线检测，焊缝内部质量，达到 JB 4730—94 Ⅱ级片合格后才能进行下面的工序。

(3) 另一封头与筒体焊接

容器没有人孔装置，焊接设备和人员无法进入容器内操作。采用的坡口形式和焊接顺序如图 4-54 所示。先用钨极氩弧焊进行打底焊，保证焊透，第 2 层焊缝采用焊条电弧焊，其目的是增加焊缝金属厚度，防止埋弧焊时由于熔深过深而将打底焊焊缝焊穿。第 3 层环形焊缝用埋弧焊完成。各层焊缝的焊接参数见表 4-64。焊后将环焊缝进行渗透检测和射线检测，合格后再进行无油干燥气压试验和氦质谱真空检漏。全部满足图样技术性能要求后才能与外容器进行组装。

表 4-64 综合焊缝的焊接参数

焊接方法	焊材牌号	焊材直径/mm	焊接电流/A	电弧电压/V	焊接速度/(mm/min)	气体流量/(L/min)
手工钨极氩弧焊	H0Cr20Ni10Ti	ϕ3.2	120～150	16	50～80	20
焊条电弧焊	A132	ϕ4	150～160	22～24	130～160	—
埋弧焊	H0Cr20Ni10Ti	ϕ4	520～560	38～39	420～440	—

注：JB 4730—94《压力容器无损检测》标准已变更为 JB/T 4730—2005《承压设备无损检测》。

4.6 设计温度较低的奥氏体不锈钢制压力容器焊接要求

(1) 母材含碳量的限制

设计温度低于－100℃且不低于－196℃的铬镍奥氏体不锈钢制容器，应根据设计温度选择合适的焊接工艺，严格控制焊接线能量不要超过焊接工艺评定的线能量上限，母材应为含碳量小于或等于 0.10%的铬镍奥氏体不锈钢，焊缝金属的化学成分符合 GB/T 983《不锈钢焊条》中的 E308、E308L、E309 和 GB/T 4233《惰性气体保护焊用不锈钢棒及钢丝》、GB/T 4242《焊接用不锈钢丝》中的 H00Cr21Ni10、H0Cr26Ni21。

(2) 焊缝金属的冲击吸收能量

在相应的焊接工艺评定中，应进行焊缝金属的低温夏比（V 形缺口）冲击试验，在不高于设计温度下的冲击吸收能量不得小于 31J（当设计温度低于－192℃时，其冲击试验温度取－192℃）。

冲击吸收能量为 31J，相当于侧向膨胀量约为 0.52mm，此工况下，美国 ASEM 规范规定侧向膨胀量不低于 0.38mm。侧向膨胀量为 0.38mm 时，相当于冲击吸收能量为 24J。

参 考 文 献

[1] 张其枢，堵耀庭．不锈钢焊接．北京：机械工业出版社，2003.
[2] HG/T 20581—2011. 钢制化工容器材料选用规定．
[3] NB/T 47015—2011（JB/T 4709）. 压力容器焊接规程．
[4] GB 150.4—2011. 压力容器　第 4 部分：制造、检验和验收．
[5] 邹尚利等．单面焊双面成形技术．北京：机械工业出版社，2002.
[6] 薛松柏等．焊接材料手册．北京：机械工业出版社，2006.
[7] 手册编写组．简明焊工手册．北京：机械工业出版社，1986.
[8] 于增瑞主编．钨极氩弧焊实用技术．北京：化学工业出版社，2004.
[9] 付积和 等主编．焊接数据资料．北京：机械工业出版社，1994.
[10] 中国机械工程学会焊接学会．焊接手册：第 2 卷．第 2 版．北京：机械工业出版社，2001.
[11] 李文利．0Cr19Ni9 不锈钢的熔化极半自动氩弧焊．焊接，1993，(5)．

第5章 铁素体型不锈钢的焊接

铁素体型不锈钢抗氧化性较好，且具有较好的耐应力腐蚀性能。这类钢加热过程中不会发生相变，也不能热处理强化。铁素体型不锈钢耐腐蚀性能和焊接性均不如奥氏体型不锈钢。铁素体型不锈钢主要用于制造耐氧化、耐腐蚀的设备。

5.1 铁素体型不锈钢的焊接特点

铁素体型不锈钢焊接过程可能导致焊接接头的塑性、韧性降低，即发生脆化的问题。同其他品种不锈钢的焊接一样，如何保证铁素体型不锈钢焊接接头具有相同于母材的耐腐蚀性，是焊接的一个关键问题；再者，对于铁素体型不锈耐热钢而言，焊接接头在高温下长期服役可能出现逐渐脆化的问题也应给予重视。

5.1.1 焊接接头的晶间腐蚀[1]

(1) 普通纯度高铬铁素体型不锈钢

① 晶间腐蚀的部位。普通纯度高铬铁素体型不锈钢焊接接头在焊接热循环的作用下，被加热到950℃以上的温度区域冷却时，会在晶间产生腐蚀的倾向。而后若在700～850℃进行短时间保温退火处理，又可恢复其耐蚀性。所以，焊接接头产生晶间腐蚀的位置是紧挨着焊缝的高温区。而奥氏体型不锈钢焊接接头的晶间腐蚀区是在最高温度为600～1000℃的区域，即晶间腐蚀的部位稍稍离开焊缝的区域。

② 晶间腐蚀的机理。普通纯铁素体型焊接接头的晶间腐蚀机理与奥氏体型不锈钢焊接接头晶间腐蚀的机理相同，均认为符合贫铬理论。铁素体型不锈钢一般在退火状态下焊接，其组织为固溶微量碳和氮的铁素体及少量均匀分布的碳和氮的化合物，组织稳定，耐蚀性较好。当焊接温度高于950℃时，碳、氮的化合物逐步溶解到铁素体相中，得到碳、氮过饱和固溶体。由于碳、氮在铁素体中的扩散速度比在奥氏体中快得多，在焊后冷却过程中，甚至在淬火冷却过程中，都来得及扩散到晶界区。加之晶界的碳、氮的浓度较高于晶内，故在晶界上沉淀出 $(Cr, Fe)_{23}C_6$ 碳化物和 Cr_2N 氮化物。由于铬的扩散速度慢，导致在晶界上出现贫铬固溶区。在腐蚀介质的作用下即会出现晶间腐蚀。由于铬在铁素体中的扩散比在奥氏体中快，故为了克服焊缝高温区的贫铬带，只需在700～900℃短时间保温，即可使过饱和的碳和氮完全析出，而铬又来得及补充到贫铬区，从而恢复到原来的耐蚀性。若在600℃较长时间保温或焊接接头自900℃以上缓慢冷却，使碳化物、氮化物充分析出，达到或接近钢材退火状态下固溶的碳和氮含量的平衡值时，仍能保持其耐蚀性。

（2）高纯度高铬铁素体不锈钢

① 晶间腐蚀倾向腐蚀机理。高纯度高铬铁素体不锈钢也有产生晶间腐蚀倾向。其腐蚀机理与奥氏体不锈钢晶间腐蚀一样，虽有多种说法，但仍可以用贫铬理论来解释。

② 热处理对晶间腐蚀的影响。热处理对超高纯度高铬铁素体不锈钢（00Cr26Mo1）晶间腐蚀率的影响见表 5-1。从表中可知：该钢从 1100℃水淬与普通高铬铁素体不锈钢不同，腐蚀率很低，不产生晶间腐蚀，晶界上没有高铬碳、氮化物析出；而在 1100℃空冷，腐蚀率很高，晶界上析出了大量的高铬碳和氮化物，有晶间腐蚀。经 1100℃×30min 水淬的试件，然后分别进行 15min 保温和 900℃的水淬，晶界上均有高铬碳、氮化物析出，但腐蚀率比 1100℃空冷低，且没有晶间腐蚀。说明晶界上析出的高铬碳、氮化物与晶间腐蚀没有相对关系（腐蚀介质为硫酸铁-硫酸溶液）。

表 5-1　热处理对超高纯度高铬铁素体不锈钢（00Cr26Mo1）晶间腐蚀速率的影响

试件号	热处理	腐蚀速率 /(μm/年)	晶界上高铬碳、氮化物析出情况	有无晶间腐蚀
1	1100℃×30min 水淬	22	无	无
2	1100℃×30min 空冷	549	大量析出	有
3	1100℃×30min 水淬＋900℃×15min 水淬	36	积聚长大	无
4	1100℃×30min 水淬＋700℃×15min 水淬	27	有	无
5	1100℃×30min 水淬＋700℃×15min 水淬	282	有	有
6	1100℃×30min 水淬＋600℃×15min 水淬	23	有	无

③ 敏化临界温度区与临界敏化时间区。高纯度高铬铁素体不锈钢主要化学成分有 Cr、Mo 和 C、N。其中 C＋N 总含量不等，都存在一个晶间腐蚀的敏化临界温度区，即超过或低于此区域不会产生晶间腐蚀。同时还有一个临界敏化时间区，即在这个区时间之前的一段时间，即使在敏化临界温度区也不会产生晶间腐蚀。由此可知：超高纯度高铬铁素体不锈钢必须满足既在敏化临界温度区，又在临界敏化时间区内才有可能产生晶间腐蚀。例如，C＋N 总的体积分数为 106×10^{-6} 的 26Cr 合金，其敏化临界温度区为 475～600℃。由于 C＋N 总含量很低，在温度为 600℃以上时，晶界上没有足够的能引起贫铬和增加腐蚀率的富铬碳、氧化物沉淀，又由于其离开临界敏化时间区很远，该合金由 950℃和 1100℃水淬或空冷，虽说冷却过程中都经过敏化临界温度，但仍可保持良好的耐蚀性。C＋N 总含量的提高，不仅扩大了敏化临界温度的区域，同时临界敏化时间区也朝前移动，即形成晶间腐蚀的时间提前了。通常超高纯度高铬铁素体不锈钢在固溶状态下焊接。有资料提出，这类钢的 C＋N 总的质量分数至少要低于 60×10^{-6}，才能避免敏化。

（3）晶间腐蚀与其合金元素的含量有关系

无论普通纯度高铬铁素体型不锈钢，还是高纯度的铁素体型不锈钢，焊接接头的晶间腐蚀倾向都与其合金元素的含量有关。

① 碳和氮的影响。随着钢中碳和氮的总含量降低，晶间腐蚀倾向减少。

② 铬的影响。铬含量的提高，自身的扩散速度加快，碳和氮扩散速度降低，总的效果是敏化区推向更长的时间和较低的温度，即高铬铁素体不锈钢引起晶间腐蚀的敏感性要低于

低铬铁素体不锈钢。

③ 钼的影响。钼可以降低氮在高铬铁素体不锈钢的扩散速度，有助于临界敏化时间向后移动较长的时间，因此含有钼的高铬铁素体不锈钢具有较高的抗敏化性能。

④ 钛和铌的影响。合金元素钛和铌为稳定化元素，能优先于铬和碳、氮形成化合物，可避免贫铬区的形成，提高其抗晶间腐蚀能力，但要求钛的含量为碳和氮总含量的6～8倍，铌的含量为碳和氮总含量的8～11倍，才能达到效果。钛不仅可以改善焊接热影响区的晶间腐蚀倾向，同时还可以稳定铁素体，防止出现马氏体组织。

5.1.2 焊接接头的脆化[1]

普通纯度高铬铁素体不锈钢在焊接过程中，焊接接头在焊接热循环的作用下，如果在950℃以上停留时间过久，便会引起热影响区晶粒急剧长大和碳、氮化物沿晶界集聚，可导致焊接接头的塑性和韧性下降。当焊接构件的刚度足够大时，在室温条件下就可能出现脆裂，即为焊接接头的脆化现象。这种粗大组织不能经过热处理进行细化。因此控制高温停留时间是选定焊接参数的基本原则。

① 高温加热引起的脆性。焊接接头从1100℃以上温度冷却后，焊接热影响区的室温韧性变低，其脆化程度与合金元素碳和氮的含量有关。碳、氮含量愈高，焊接热影响区脆化程度就愈严重。焊接接头冷却速度愈快，其韧性下降值愈多；如果空冷或缓冷，塑性将提高。其原因在于快速冷却过程中基体位错上出现了细小分散的析出物，阻碍位错运动，此时强度提高了，而塑性和韧性则明显降低；在慢冷过程中，位错上没有析出物，所以塑性不会降低。

② σ相脆性。普通纯度铁素体型不锈钢（不论母材或焊缝）中 $w_{Cr}>21\%$ 时，若在520～820℃之间长期加热，会出现一种又硬又脆的铁与铬的金属间化合物 Fe_nCr_m（高达800～1000HV）叫σ相。σ相形成与焊缝金属中的化学成分、组织、加热温度、保温时间以及预先冷形变诸因素有关。

a. 铝、硅、钼、钛和铌。促进铁素体形成的元素均能强烈地增大产生σ相的倾向。

b. 锰。锰能使高铬钢形成σ相所需铬的含量降低。

c. 碳和氮。碳和氮使形成σ相所需铬含量提高，这是由于它们能稳定奥氏体相，并能与铬形成其化合物之故，从而减低了铁素体中铬的含量。

d. 镍。镍能使形成σ相所需温度提高。预先冷形变可促进σ相形成的速度，且使σ相形成的温度降低，同时还能降低钢中形成σ相的最低临界铬含量（$w_{Cr}<20\%$）。

由于σ相的形成有赖于Cr、Fe等原子的扩散迁移，故形成速度较慢，所以对多数钢材来说，焊接热过程本身甚至通常的焊后热处理，都不易造成明显的σ相脆化。然而，对于长期工作于σ相形成温度区的铁素体型不锈钢构件而言，则是必须重视这一问题。一般认为800℃高温时，σ相形成速度可能达到最高值，低于此温度形成σ相速度减慢，但需要较长的时间。

③ 475℃脆性。当 $w_{Cr}\geqslant15.5\%$ 的普通纯铁素体型不锈钢在400～500℃长期加热后，常常会出现强度升高韧性下降的现象，称之为475℃脆性。一般随含铬量提高而脆化的倾向严重。该现象在马氏体型不锈钢和半奥氏体沉淀硬化型不锈钢中亦偶有发生，但均没有铁素体型不锈钢那样明显。若铁素体型不锈钢中 w_{Cr} 在14%左右，在此温度区间长时间运行，亦会对475℃脆性产生敏感。构件在400～600℃范围运行后，冷却速度小于10℃/s时，也可产生脆化；且冷却速度愈慢，脆化愈严重。$w_{Cr}<12\%$ 的铁素体型不锈钢，可避免脆化的形成。焊接接头在焊接热循环作用下，不可避免地要经过该温度区，特别是当焊缝金属和热影响区在此温度区停留时间较长时，均有产生475℃脆性的可能。475℃脆性可通过700～

800℃短时间加热，紧接着进行水冷的处理来消除。

④ 局部马氏体引起的脆性。大多数铁素体型不锈钢在室温下能形成稳定的铁素体组织。但是，如果钢或焊缝金属中含铬量偏于铁素体区的下限或者碳和氮含量在允许范围的上限时，可导致高温时在晶界形成一些奥氏体，冷却后转变为马氏体组织，产生轻度脆化。退火处理可使马氏体转变为铁素体组织。

5.1.3　铁素体型不锈钢的焊接工艺原则

为了克服普通纯度高铬铁素体型不锈钢在焊接过程中出现的晶间腐蚀和焊接接头脆化而引起的冷裂纹，在焊接工艺上应采取以下措施。

(1) 普通纯度铁素体不锈钢的焊接工艺原则

① 预热。铁素体不锈钢在室温时韧性较低，焊接时焊接接头易形成高温脆化，在一定条件下可能产生裂纹。通过预热，使焊接接头处于富有韧性的状态下施焊，能有效地防止裂纹的产生；但是，焊接时的热循环又会使焊接接头近缝区的晶粒急剧长大粗化，从而引起脆化。为此，预热温度的选择要慎重，一般控制在 100～150℃，目的在于使被焊材料处于韧性较好的状态和降低焊接接头的应力。随着母材金属中含铬量的提高，预热温度可相应提高。预热温度过高，又会使焊接接头过热而脆硬。

② 焊接材料的选择。最好选用含有 Ti、Nb 稳定化元素的高纯铁素体不锈钢焊接材料，以防止多层多道焊接时产生敏化，以及焊缝金属吸收焊接气氛中的 C 和 N 后造成晶间腐蚀。控制焊缝中 Ni、Cu 和 Mo 的含量，防止 Ni、Cu 和 Mo 含量超过临界值，接头在氯离子介质中产生应力腐蚀[2]。

可以焊前预热或焊后进行热处理的焊接构件，可选用与母材金属化学成分相同的焊接材料；对于不允许预热或焊后不能进行热处理的焊接构件，应选用奥氏体不锈钢焊接材料，以保证焊缝具有良好的塑性和韧性。

当采用同质的焊接材料时，接头的耐腐蚀性能与铁素体母材接近，但焊缝金属晶粒为粗大的铁素体组织，韧性很差。须通过焊后热处理，使焊接接头的塑性得到改善，韧性略有提高。

③ 475℃脆性的防止。475℃脆性是高铬铁素体不锈钢焊接时的主要问题之一。焊接时采取小的热输入，窄道焊接并控制道间温度，缩短铁素体不锈钢焊接接头在这个温度区间的停留时间，以防止 475℃脆性的产生[2]。

一旦出现 475℃脆性，可以在 600℃以上温度短时间加热，再以较快的速度冷却，给予消除。

④ 焊后热处理。对于同质材料焊成的铁素体不锈钢焊接接头，热处理的目的是使焊接接头组织均匀化，使过饱和碳和氮完全析出，铬来得及补充到贫铬区，以恢复其耐蚀性；同时也可改善焊接接头的塑性，从而提高其塑性及耐蚀性。焊后热处理温度为 750～800℃，是一般的回火温度，实际上是空冷的退火处理。值得注意的是，退火后应快冷，以防止 475℃脆性产生。

⑤ 热输入。在焊接过程中，应采用小的热输入进行施焊，以减少高温脆化和 475℃脆性的影响。

当选用的焊接材料与母材金属的化学成分相当时，必须按上述工艺措施进行。如选用奥氏体不锈钢焊接材料，则可免除焊前预热和焊后热处理，但对于不含稳定化元素的铁素体型不锈钢焊接接头来说，热影响区的粗晶脆化和晶间腐蚀问题不会因填充材料改变而变化。奥氏体或奥氏体-铁素体焊缝金属基本上与铁素体型不锈钢母材等强度；但在某些腐蚀介质中，这种异质焊接接头的耐蚀性可能低于同质的接头。

（2）高纯度高铬铁素体不锈钢的焊接工艺原则

① 焊接方法。焊接方法应选择氩弧焊、等离子弧焊和真空电子束焊。

② 焊接材料。焊接材料选用与母材金属化学成分相同的焊接材料焊接时，要严格保护好焊接熔池，防止空气中氮气侵入熔池，进而提高焊缝金属中氮和碳的总含量，导致晶间腐蚀的产生。

选用与母材金属化学成分不同的焊接材料焊接时，要严格控制焊接材料中的碳、氮含量和提高铬元素含量，以提高焊接接头抗腐蚀能力。同样的，对焊接材料和熔池的表面净化，也是提高焊接接头抗腐蚀性能的一项重要的工艺手段。

要求焊接材料不得污染；焊接熔池、焊缝背面都要有效保护，防止空气的侵入，最好采用通氩冷却或通水冷铜垫板。

③ 预热。高纯高铬铁素体型不锈钢板厚度小于5mm时焊前可不预热，焊后不必进行热处理，焊接接头仍可保持足够的韧性，耐腐蚀性也好。焊接工艺的要点是使焊缝金属中碳加氮的含量不高于母材金属的含量，首先焊接材料必须满足这一要求。

④ 热输入。采用小的热输入进行焊接，以减少过热，增加冷却速度。

⑤ 道间温度。多层焊时道间温度要控制在100℃左右。

5.2 铁素体型不锈钢的焊接方法

5.2.1 普通纯度铁素体不锈钢的焊接方法

普通纯度铁素体不锈钢的焊接方法通常采用焊条电弧焊、钨极氩弧焊、熔化极气体保护焊和埋弧焊等。

（1）焊条电弧焊

① 焊接材料。焊条电弧焊填充金属主要分两类：一类为同质的铁素体型焊条；另一类为异质的奥氏体型（或镍基合金）焊条。

② 用同质焊条焊成的焊缝的优点。焊缝与母材金属有一样的颜色和形貌，相同的线胀系数和大体相似的耐蚀性，但抗裂性不高。用奥氏体焊条所焊成的焊缝具有很好的塑性，应用较多，但要控制好母材金属对奥氏体焊缝的稀释。用奥氏体焊条施焊，不能防止热影响区的晶粒长大和焊缝形成马氏体组织，而且焊缝与母材金属的色泽也不相同。

③ 焊接材料的选用。焊接普通纯度铁素体型不锈钢常用同质焊条和异质焊条的型号和牌号见表5-2。普通纯度铁素体不锈钢用焊条电弧焊进行对接平焊时，坡口形式及焊接工艺参数见表5-3。从表中可以看出，采用小的热输入的目的是抑制焊接区的铁素体晶粒过分长大。施焊时尽量减少焊缝截面，不要连续多道施焊，要待前一道焊缝冷却到预热温度时，再焊下一道焊缝。

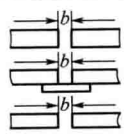
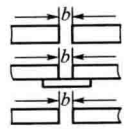
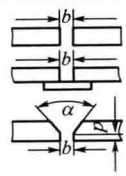
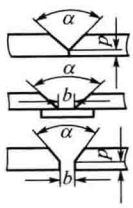
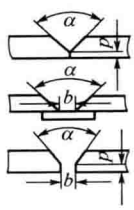
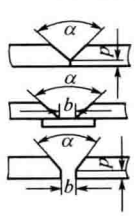
表5-2 焊接普通纯度铁素体不锈钢常用焊条[1,3]

母材钢号	对焊接接头性能的要求	焊条			预热及热处理温度
		型号	牌号	合金系统	
Cr17 Cr17Ti	耐硝酸及耐热	E430	G302	Cr17	预热100～200℃ 焊后750～800℃回火
Cr17 Cr17Ti Cr17Mo2Ti	提高焊缝塑性	E316	A207	18-12Mo2	不预热 焊后不热处理

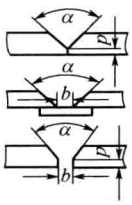
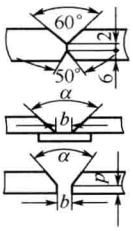
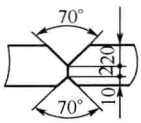
续表

母材钢号	对焊接接头性能的要求	焊条			预热及热处理温度
		型号	牌号	合金系统	
Cr25Ti	抗氧化性	E309	A307	25-13	不预热 焊后 760～780℃回火
Cr28 Cr28Ti	提高焊缝塑性	E310 E310Mo	A402 A412	25-20 25-20Mo2	不预热 焊后不热处理

表 5-3　焊条电弧焊焊接普通纯度铁素体不锈钢对接平焊缝的坡口形式及焊接工艺参数[1]

板厚/mm	坡口形式	层数	坡口尺寸			焊接电流/A	焊接速度/(mm/min)	焊条直径/mm	备注
			间隙/mm	钝边/mm	坡口角度/(°)				
2		2 1 1	0～1 2 0～1	— — —	— — —	40～60 80～110 60～80	140～160 100～140 100～140	2.5 3.2 2.5	背面清根 垫板 —
3		2 1 2	2 3 2	— — —	— — —	80～110 110～150 90～110	100～140 150～200 140～160	3.2 4.0 3.2	背面清根 垫板 —
5		2 2 2	3 4 2	— — 2	— — 75	80～110 120～150 90～110	100～140 140～180 140～180	3.2 4.0 3.2	背面清根 垫板 —
6		4 2 3	0 4 2	2 — 2	80 60 75	90～140 140～180 90～140	160～180 140～150 140～160	3.2 4.0,5.0 3.2	背面清根 垫板 —
9		4 3 4	0 4 2	3 — 2	80 60 75	130～140 140～180 90～140	140～160 140～160 140～160	4.0 4.0,5.0 3.2	背面清根 垫板 —
12		5 4 4	0 4 2	4 — 2	80 60 75	140～180 140～180 90～140	120～180 120～160 130～160	4.0,5.0 4.0,5.0 3.2,4.0	背面清根 垫板 —

续表

板厚/mm	坡口形式	层数	坡口尺寸			焊接电流/A	焊接速度/(mm/min)	焊条直径/mm	备注
			间隙/mm	钝边/mm	坡口角度/(°)				
16		7	0	6	80	140～180	120～180	4.0,5.0	背面清根
		6	4	—	60	140～180	110～160	4.0,5.0	垫板
		7	2	2	75	90～180	110～160	3.2,4.5	—
32		7	—	2	—	140～180	130～180	4.0,5.0	背面清根
		9	4	—	45	160～200	110～170	5.0	垫板
		10	2	2	45	90～180	110～160	3.2,4.5	—
32		14	—	2	70	160～200	140～170	5.0	背面清根

用相同材质焊条对 10Cr17（1Cr17）、008Cr30Mo2（00Cr30Mo2）钢进行对接接头施焊，其熔敷金属成分，见表 5-4，焊接接头力学性能见表 5-5。

表 5-4 相同材质焊接接头的质量分数[1,4]

钢号	焊缝化学成分(质量分数)/%						
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	N
10Cr17(1Cr17)	0.12	1.0	1.0	16～18	0.60	—	—
008Cr30Mo2(00Cr30Mo2)	0.010	0.10	0.40	28.50～32.00	—	1.50～2.50	0.015

表 5-5 相同材质焊接接头的力学性能[1,4]

钢号	力学性能						
	热处理	σ_b/MPa	σ_s/MPa	ψ/%	δ_5/%	a_{kV}/(J/cm²)	弯曲角/(°)
10Cr17(1Cr17)	焊后状态	706	627	脆性断口	60	—	
	650℃退火	637	451	18	48	80	—
008Cr30Mo2(00Cr30Mo2)	焊后状态	554	—	—	—	—	10～15
	650℃退火	564	—	—	—	—	40～50

（2）其他焊接方法焊接材料的选用

铁素体不锈钢焊接可采用药芯不锈钢焊丝，我国的药芯不锈钢焊丝 GB/T 17853—1999《不锈钢药芯焊丝》（等效采用了 ANSI/AWS A5.22—1995《电弧焊不锈钢药芯焊丝及钨极惰性气体保护焊不锈钢药芯填充焊丝规程》）规定了不锈钢用药芯焊丝的熔敷金属成分，详

见表 5-6。铁素体不锈钢焊接也可采用实心不锈钢焊丝，我国的不锈钢焊丝 GB/T 4241—2006《焊接用不锈钢盘条》标准（等效采用了美国 AWS A5.9—1993《不锈钢焊丝和焊棒》）规定了焊条用焊芯、气体保护焊丝、埋弧焊丝、电渣焊用焊丝的熔敷金属化学成分，其中铁素体型焊丝的熔敷金属化学成分见表 5-7。从表中可以看出，H01Cr26Mo（相当于 AWS A5.9 标准的 ER446LMo 焊丝）是一种纯度很高的埋弧焊焊丝，但在埋弧焊施焊过程中，由于焊剂的影响，其焊缝金属的纯度可能会降低。

表 5-6　铁素体不锈钢焊接用药芯焊丝的熔敷金属化学成分的质量分数[5,6]　%

GB/T 17853 型号	C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	P	S	Cu
E430T-×	0.10	15.0～18.0	0.60	0.5	1.2	1.0	0.04	0.03	0.5
E430T-3	0.10	15.0～18.0	0.60	0.5	1.0	1.0	0.04	0.03	0.5

注：表中各元素含量均为最大值。

表 5-7　铁素体不锈钢埋弧焊及气体保护焊的焊丝熔敷金属化学成分的质量分数[7]　%

型号	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	N	其他
H06Cr14	0.06	0.30～0.70	0.30～0.70	0.030	0.030	13.00～15.00	0.60	0.75	0.75	—	—
H10Cr17	0.10	0.50	0.60	0.030	0.030	15.5～17.0	0.60	0.75	0.75	—	—
H01Cr26Mo	0.015	0.40	0.40	0.020	0.020	25.00～27.50	Ni+Cu ≤0.50	0.75～1.50	Ni+Cu ≤0.50	0.015	—
H08Cr11Ti	0.08	0.80	0.80	0.03	0.030	10.50～13.50	0.60	0.50	0.75	—	Ti:10C～1.5
H08Cr11Nb	0.08	1.00	0.80	0.040	0.030	10.50～13.50	0.60	0.50	0.75	—	Nb:10C～0.75

注：1. 表中各元素的含量均为最大值。

2. 目前只有 H10Cr17 焊丝列入 2012 版我国《焊接材料产品手册》。

采用埋弧焊时为了增加接头的塑性可选用 GB/T 17854《不锈钢焊丝焊剂》标准规定的焊丝与焊剂。采用气体保护焊时，也可选用 YB/T 5092—2005《焊接用不锈钢丝》标准规定的焊丝，但该标准只有 H10Cr17 焊丝的熔敷金属为铁素体型。

（3）操作要点[1,8]

① 采用小的热输入，焊接时采用窄道焊技术，焊接材料不摆动，快的焊接速度，多层多道焊。尽量减少焊接接头在高温的停留时间，以防止焊接接头的热影响区晶粒长大过快，提高焊接接头的塑性。

② 多层焊时，要严格控制道间温度在 150℃左右，不宜连续施焊。

③ 采用强制冷却焊缝的方法，以减少焊接接头的高温脆化和 475℃脆性，防止裂纹的形成。同时还可以减少焊接接头的热影响区过热。其方法是通氩冷却或通水冷却铜垫板等。

5.2.2　高纯度高铬铁素体不锈钢[1]

（1）焊接方法

高纯度高铬铁素体不锈钢焊接的方法有氩弧焊、等离子弧焊和真空电子束焊。

（2）工艺措施

① 增加熔池保护，如采用双面气体保护，用气体透镜，增大喷嘴直径，适当增大氩气流量；或者采取在焊枪后面加保护气拖罩（拖罩结构参见图 5-1）的办法，延长焊接熔池的

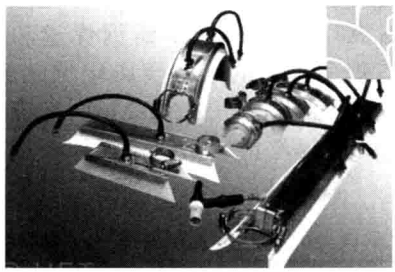


图 5-1 保护气体拖罩

保护时间。

② 焊接时要采用提前通氩气，滞后停气的焊接设备，使焊缝始末端均在有效气体保护范围内。

③ 提高氩气纯度，用高纯度氩气进行施焊，以减少氮和氧的含量，提高焊缝金属的净化程度。

④ 填充焊丝时不允许焊丝末端离开保护区。

⑤ 焊缝背面要通氩气保护，最好采用通氩的水冷铜垫板，减少过热，增加冷却速度。

⑥ 尽量减小热输入，多层焊时控制道间温度低于 100℃。

(3) 焊接材料的选择

国内铁素体不锈钢焊条的选用见表 5-8，国外铁素体不锈钢焊条的选用见表 5-9。铁素体不锈钢埋弧焊用焊接材料见表 5-10。铁素体不锈钢焊接材料选用举例见表 5-11。

表 5-8 国内铁素体不锈钢焊条的选用[3]

钢号	焊条型号	焊条牌号	焊缝金属类型	预热及道间温度/℃	焊后热处理	选用原则
0Cr13	E410-16 E410-15 E1-13-1-15	G202 G207 G217	Cr13	300～350	700～750℃空冷	耐蚀、耐热
	E308-16 E308-17 E308-15	A102 A102A A107	Cr18Ni9	150～300	—	高塑、韧性
	E309-16 E309-15	A302 A307	Cr25Ni13			
	E310-16 E310-15	A402 A407	Cr25Ni20			
0Cr17 0Cr17Ti 1Cr17Ti	E430-16 E430-15	G302 G307	Cr13	100～200	700～760℃空冷	耐蚀、耐热
	E308-16 E308-17 E308-15	A102 A102A A107	Cr18Ni9	70～150	—	高塑、韧性
	E309-16 E309-15	A302 A307	Cr25Ni13			
Cr25Ti	E309-16 E309-15	A302 A307	Cr25Ni13	不预热	700～760℃空冷	耐热及高塑、韧性
Cr28 Cr28Ti	E310-16 E310-15	A402 A407	Cr25Ni20	不预热	—	
	E310Mo-16	A412	Cr25Ni20Mo2			

表 5-9 国外铁素体不锈钢焊条的选用[3]

钢号			焊接材料型号		
AISI	UNS	德国钢号	第一选择	第二选择	第三选择
405	S40500	1.4002	430	309L/309Mo	308

续表

钢号			焊接材料型号		
AISI	UNS	德国钢号	第一选择	第二选择	第三选择
409	S40900	1.4512	309L/309Mo	312	
429	S42900	1.4001	430	308/308L	309L/309Mo
430	S43000	1.4016	430	308/308L	309L/309Mo
430F	S43020	1.4104	430	308/308L	309L/309Mo
430FSe	S43023		430	308/308L	309L/309Mo
434	S43400	1.4113	430	308/308L	309L/309Mo
436	S43500		430	308/308L	309L/309Mo
442	S44200		316L	318	309L/309Mo
444	S44400	1.4521	316L	318	309L/309Mo
446	S44600	1.4762	308/308L	309L/309Mo	310

注：AISI 为美国钢铁学会标准。UNS 为美国金属与合金牌号的统一数字标准［由美国汽车工程师学会（SAE）与美国材料试验学会（ASTM）于 1974 年联合提出］。

表 5-10　铁素体不锈钢埋弧焊用焊丝及焊剂[5]

钢号	焊剂牌号及焊丝牌号	
06Cr13 (0Cr13)	HJ150 HJ260 SJ601	H06Cr14 H12Cr24Ni13 H12Cr26Ni21
10Cr17(1Cr17) 10Cr17Mo(1Cr17Mo)	SJ601 SJ608 SJ701 HJ172 HJ151	H10Cr17 H08Cr21Ni10 H12Cr24Ni13 H08Cr26Ni21

表 5-11　铁素体不锈钢焊接材料选用举例[2]

钢号	焊条电弧焊焊条		氩弧焊丝	预热及层间温度/℃	焊后热处理/℃	选择原则
	型号	牌号				
06Cr13 (0Cr13)	E410-16 E410-15	G202 G207 G217	H0Cr14	—	700～760	耐腐蚀、耐热
06Cr13 (0Cr13)	E309-16 E309-15 E310-16 E310-15	A302 A307 A402 A407	H0Cr21Ni10 H0Cr18Ni12Mo2	—	—	高塑、韧性
10Cr17(1Cr17) 0Cr17Ti 1Cr17Ti 1Cr17Mo2Ti	E430-16 E430-15	G302 G307	H1Cr17	70～150	700～760	耐腐蚀、耐热
	E308-15 E316-16 E309-15	A107 A207 A307	H0Cr21Ni10 H0Cr18Ni12Mo2	70～150	—	高塑、韧性
1Cr25Ti	E308-15 E316-16	A107 A207	H0Cr24Ni13 H0Cr26Ni21	—	—	高塑、韧性
1Cr28	E310-15	A407	H0Cr26	—	—	高塑、韧性

(4) 铁素体型不锈钢的热处理

铁素体型不锈钢的热处理工艺及力学性能见表 5-12。

表 5-12 铁素体型不锈钢的热处理工艺及力学性能[9]

牌号	热处理	拉伸试验				冲击吸收功 A_{kV} /J	硬度试验 (HBS)
		$\sigma_{0.2}$ /MPa	σ_b /MPa	δ_5 /%	ψ /%		
		不小于					不大于
06Cr13Al (0Cr13Al)	退火 780～830℃，空冷或缓冷	177	410	20	60	78	183
022Cr12 (00Cr12)	退火 700～820℃，空冷或缓冷	196	265	22	60	—	183
10Cr17 (1Cr17)	退火 780～850℃，空冷或缓冷	205	450	22	50	—	183
Y1Cr17	退火 680～820℃，空冷或缓冷	205	450	22	50	—	183
10Cr17Mo (1Cr17Mo)	退火 780～850℃，空冷或缓冷	205	450	22	60	—	183
008Cr30Mo2 (00Cr30Mo2)	退火 900～1050℃，快冷	295	450	20	45	—	228
008Cr27Mo (00Cr27Mo)	退火 900～1050℃，快冷	245	410	20	45	—	219

参考文献

[1] 张其枢，堵耀庭．不锈钢焊接．北京：机械工业出版社，2003.

[2] 陈祝年．焊接工程师手册．北京：机械工业出版社，2001.

[3] 吴树雄，尹士科编著．电焊条选用指南．第 2 版．北京：化学工业出版社，2002.

[4] GB/T 20878—2007. 不锈钢、耐热钢牌号和化学成分．

[5] 机械科学研究院哈尔滨焊接研究所．焊接材料产品手册．北京：机械工业出版社，2012.

[6] GB/T 17853—1999. 不锈钢药芯焊丝．

[7] GB/T 4241—2006. 焊接用不锈钢盘条．

[8] 杜国华主编．实用工程材料焊接手册．北京：机械工业出版社，2004.

[9] GB/T 1220—2007. 不锈钢棒．

第6章 马氏体型不锈钢的焊接

马氏体型不锈钢在中高温度下存在的奥氏体，以较快的冷却条件时，奥氏体会转变为马氏体。马氏体型不锈钢属于淬硬组织的钢种，其耐腐蚀性能和焊接性要比奥氏体型、铁素体型不锈钢差。

6.1 马氏体型不锈钢的焊接特点

马氏体型不锈钢具有高硬度、高耐磨性、耐疲劳特性、耐热性以及适当的耐腐蚀能力，但焊接性很差。

焊接低合金调质结构钢的原则，也适用于马氏体型不锈钢的焊接。

为了获得优质的焊接接头，应注意下列焊接工艺特点。

6.1.1 焊接接头的冷裂纹

马氏体型不锈钢焊缝和热影响区的常温组织为硬脆的马氏体组织。马氏体型不锈钢导热性较碳钢差，焊接残余应力较大，如果焊接接头刚度又大或焊接过程中含氢量又较高，当从高温直接冷却至120～100℃以下时，很容易产生冷裂纹。

对于不再进行热处理的焊件，焊接热影响区将会出现局部高温回火软化带。因而应尽量减少软化区的范围，这也是制定和执行此类钢焊接工艺时应当注意的问题之一。

6.1.2 焊前预热和焊后热处理

对于用同质焊接材料焊接马氏体不锈钢时，预热是防止冷裂纹的重要措施，钢的淬硬性愈大，焊接接头的拘束度也愈大，则预热温度应选高些，一般为160～320℃。多层焊时仍需保持道间温度，焊后还要进行热处理。

不论采用焊条电弧焊、熔化极气体保护焊还是埋弧焊等焊接方法，焊前均需预热，预热温度与钢中碳含量有关，详见表6-1。马氏体不锈钢焊后需要热处理，焊后热处理的作用是消除或降低残余应力，降低焊缝金属与热影响区的硬度，改善焊接接头的韧性，同时减少焊接残余应力。对于刚度小的焊接构件，焊后可以在冷至室温后再热处理。对于大厚度的焊接件，特别是钢材中含碳量较高时，需要采用复杂的热处理工艺。

表6-1 马氏体型不锈钢推荐使用的预热、热输入及焊后热处理规范[1]

w_C/%	预热温度/℃	热输入	焊后热处理要求
≤0.10	≤200		任选

续表

w_C/%	预热温度/℃	热输入	焊后热处理要求
>0.10～0.20	200～250	一般	任选缓慢冷却
>0.20～0.50	250～320		必须焊后热处理
>0.50	250～320	大	必须焊后热处理

（1）预热温度的选择

焊接马氏体型不锈钢时，若选用与母材金属成分相同的焊接材料时，为了防止焊接接头形成冷裂纹，焊前必须预热。预热温度一般在200～320℃，且最好不要高于该钢号的马氏体开始转变温度。

预热温度的选择与材料厚度、填充金属种类、焊接方法和构件的拘束程度有关。其中与钢的碳含量关系最大；当碳的质量分数小于0.1%时，预热温度可小于200℃；当碳的质量分数为0.1%～0.2%时，预热温度为200～250℃；当碳的质量分数大于0.2%时，除预热温度要适当提高外，还必须考虑保证多层焊时的道间温度。

马氏体型不锈钢的预热温度不宜过高，否则将使奥氏体晶粒粗大，并且随冷却速度降低，还会形成粗大铁素体加晶界碳化物组织，使焊接接头塑性和强度均有所下降。

（2）焊后回火热处理和后热处理

在淬火＋回火即调质状态下进行焊接的焊件焊后热处理采用回火处理。焊后热处理（回火处理）前对焊件温度有严格的要求，焊件焊后不可随意从焊接温度直接升温进行回火热处理。这是因为在焊接过程中形成的奥氏体尚未完全转变成马氏体，其未分解的奥氏体在立即升温到回火热处理温度的过程中，会发生珠光体转变，或者碳化物沿奥氏体晶界沉淀，产生粗大铁素体加碳化物组织，从而严重地降低焊接接头的韧性，也影响强度，可能造成焊接接头的脆断，且降低耐蚀能力。如果焊接接头焊后空冷到室温后再进行热处理，则马氏体不锈耐热钢会出现空气淬硬倾向，造成常温塑性降低，并且在常温下残留的奥氏体将继续转变为马氏体组织，使焊接接头变得又硬又脆，组织应力也随之增大；若再加上扩散氢的聚集，焊接接头就有可能产生冷裂纹。正确的方法是：回火前使焊件适当冷却，让焊缝和热影响区的奥氏体基本分解为马氏体组织。

对于刚度大的焊接构件，特别是碳含量较高时，需要进行准确的后热处理：焊接区空冷至100～150℃，立即在此温度保温1～2h。其目的有两个：一是让奥氏体充分分解为马氏体，又不至于立即过分脆化；二是使焊缝中氢向外扩散，起到消氢作用。然后加热至回火温度，适当保温，使马氏体充分回火，得到理想的回火组织。

回火温度一般选在650～750℃，至少保温1h后空冷。或者按每30mm厚的焊缝保温1h，随后空冷。有关焊后热处理回火温度对12Cr13（1Cr13）和20Cr13（2Cr13）钢焊接热影响区脆性的影响见表6-2。对于刚度小的焊接构件，焊后可冷至室温后再进行回火热处理。

表6-2 回火温度对焊接热影响区脆性的影响[1]

焊接接头试验状态及母材金属成分	距熔合线不同距离(mm)的 a_{kU}/(J/cm²)				
	0	1	2	3	8
焊后状态，含碳0.1%的1Cr13钢	32.3～37.2	26.5～35.3	20.6～22.5	20.6～22.5	72.5～76.4
焊后状态，含碳0.2%的2Cr13钢	5.9～7.8	5.9～6.9	3.9～5.9	5.9～6.9	67.6～77.4

续表

焊接接头试验状态及母材金属成分	距熔合线不同距离(mm)的 a_{kU}/(J/cm²)				
	0	1	2	3	8
焊后 720℃ 回火，含碳 0.1% 的 1Cr13 钢	55.9～63.7	48～50	38.2～46.1	37.2～44.1	74.5～77.4
焊后 720℃ 回火，含碳 0.15% 的 2Cr13 钢	57.8～61.7	44.1～47	31.4～39.2	32.3～41.2	66.6～71.5
焊后 720℃ 回火，含碳 0.2% 的 2Cr13 钢	53.9～59.8	40.2～49	30.4～35.3	28.4～36.3	63.7～73.5
焊后 720℃ 回火，含碳 0.25% 的 2Cr13 钢	46.1～50	31.4～36.3	28.4～34.3	26.5～34.3	61.7～69.6

注：1. 焊接材料为 E410 焊条。

2. 含碳量均为质量分数。

对于焊后需要机械加工的构件，为了得到最低硬度，必须采用高温退火，退火温度为 830～880℃，保温 2h 后随炉冷至 650℃，然后空冷。

（3）调质热处理

高铬马氏体不锈钢一般在淬火＋回火的调质状态下进行焊接，焊后经高温回火处理，使焊接接头具有良好的力学性能。如果钢材在退火状态下焊接，会出现不均匀的马氏体组织，因此，整个焊接构件焊后还需进行调质处理，使焊接接头具有均匀的性能。

6.1.3　焊接方法的选择

焊条电弧焊、钨极氩弧焊、熔化极气体保护焊、等离子弧焊、埋弧焊等都可用于马氏体不锈钢的焊接，但由于马氏体不锈钢导热性差，易过热，在热影响区产生粗大组织，故不常用埋弧焊焊接马氏体不锈钢。

（1）焊条电弧焊

焊条电弧焊焊接马氏体型不锈钢是常用的焊接方法之一，焊条电弧焊适用于中、厚板的马氏体型不锈钢的焊接。焊接时，要选用适当的焊条，以保证焊缝金属的化学成分和组织与母材相似，便于进行热处理，得到力学性能和耐蚀性与母材相当的焊接接头。若不要求焊接接头性能同母材相当或焊后的构件不需要进行热处理时，则可选用高塑性和韧性的奥氏体不锈钢焊条或镍基合金的焊条。焊条应选用低氢型的，在施焊前要进行烘干处理，以消除焊条药皮中的水分，减少焊接区的扩散氢含量和降低冷裂纹的敏感性。焊接时应采用大的热输入施焊，大电流、缓慢的焊接速度。

（2）钨极氩弧焊

钨极氩弧焊适用于薄板焊接，采用直流正极性能提高焊接质量，但要妥善保护好正面和背面焊接熔池，以防止氧化。用氩弧焊焊接薄板时，可以不预热，冷裂纹倾向较小；焊接厚板时焊前要预热，焊后要高温回火。

（3）熔化极气体保护焊

熔化极气体保护焊焊接马氏体不锈钢时常用 CO_2 作为保护气体，填充金属常用药芯不锈钢焊丝。采用 CO_2 气体保护焊时，其冷裂纹倾向小于焊条电弧焊，但需要焊前预热，后热和焊后热处理。

6.1.4　控制焊缝金属的化学成分

焊缝金属的化学成分主要取决于焊接材料。为了保证焊接结构的使用性能，焊缝金属的

化学成分可以通过两个途径取得：一是采用与母材金属的化学成分相同或相接近的焊接材料；二是采用与母材金属化学成分完全不相同的焊接材料，如采用奥氏体不锈钢材料。

用与母材金属成分相同或相接近的焊接材料施焊时，焊缝与热影响区将会硬化变脆，有很高的冷裂纹倾向。为了防止冷裂纹产生，对于材料厚度大于 2mm 的焊件通常要进行预热，焊后要缓冷，还要进行热处理，以消除焊接应力，从而有助于提高焊接接头性能。

当焊接构件不能进行预热或者不便进行热处理时，可以使用与母材金属化学成分不相同的奥氏体不锈钢焊接材料进行施焊。其焊缝金属为奥氏体组织，焊缝具有较高的塑性和韧性，它能松弛焊接应力，并能够溶入较多的固溶氢，所以能降低焊接接头形成冷裂纹的倾向。但是这种焊接接头的材质不均匀，焊缝与母材金属的热膨胀系数也不相同，在循环温度下长期工作，在熔合区产生的切应力可能会导致焊接接头提前失效，应引起重视。

6.2 马氏体型不锈钢的焊条电弧焊工艺

6.2.1 焊前准备

焊前准备包括编制焊接工艺文件、坡口加工、预热、施焊环境（温度、湿度、风速等）、焊接设备、焊工资格、保温措施、焊后热处理等。

6.2.2 马氏体型不锈钢的焊接方法与焊接工艺参数

马氏体型不锈钢的焊接方法有焊条电弧焊、气体保护焊和埋弧焊等。

(1) 焊条电弧焊

它是马氏体型不锈钢常用的一种焊接方法，焊接时采用大的热输入，即较大的焊接电流，缓慢的冷却速度。

① 焊接材料。焊接材料一般采用与母材同材质的低氢型焊条。如焊后不能热处理，则可选用抗裂性能好的奥氏体钢类型焊条。此时相当于异种钢焊接，可运用舍夫勒（Schaeffler）组织图、德龙（Delong）组织图，合理选择焊条，并严格控制母材对焊缝的稀释。国内马氏体不锈钢焊接用焊条见表 6-3，国外马氏体不锈钢焊条的选用见表 6-4。

表 6-3 国内马氏体不锈钢焊条的选用[2~4]

钢号	焊条型号（GB/T 983）	焊条牌号	焊缝金属类型	预热及道间温度/℃	焊后热处理	选用原则
06Cr13(0Cr13) 12Cr13(1Cr13)	E410-16 E410-15 E410-15	G202 G207 G217	Cr13	300～350	①	耐蚀、耐热
20Cr13(2Cr13)	E410-15	G217	Cr13			
06Cr13(0Cr13) 12Cr13(1Cr13) 20Cr13(2Cr13)	E309-16 E309-15	A302 A307	Cr25Ni13	200～300	—	高塑、韧性
	E310-16 E310-15	A402 A407	Cr25Ni20			

续表

钢号	焊条型号（GB/T 983）	焊条牌号	焊缝金属类型	预热及道间温度/℃	焊后热处理	选用原则
14Cr17Ni2（1Cr17Ni2）	E430-16 E430-15	G302 G307	Cr17	300～350	②	耐蚀、耐热
	E308-16 E308-15	A102 A107	Cr18Ni9	200～300	—	高塑、韧性
	E309-16 E309-15	A302 A307	Cr25Ni13			
	E310-16 E310-15	A402 A407	Cr25Ni20			

① 加热到 730～760℃，保温 1h，以不高于 110℃/h 的速度炉冷至 315℃以下，然后空冷至室温。

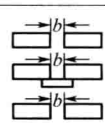
② 加热到760～790℃，保温 2h，以不高于 55℃/h 的速度炉冷至 595℃以下，然后空冷至室温。

表 6-4　国外马氏体不锈钢焊条的选用[2]

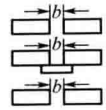
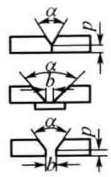
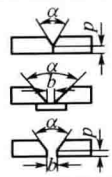
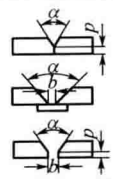
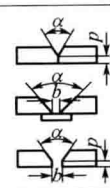
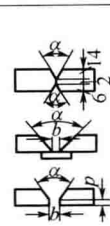
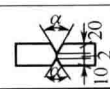
钢号			焊接材料型号		
AISI	UNS	德国钢号	第一选择	第二选择	第三选择
3Cr12			309L/309Mo	316L	308L
410	S41000	1.4006	410	309L/309Mo	310
414	S41400		410	309L/309Mo	310
415	S41500	1.4313	410	309L/309Mo	310
416	S41600		410	309L/309Mo	310
416Se	S41623		410	309L/309Mo	310
420	S42000		410	309L/309Mo	310
431	S43100	1.4057	430	308L/308	309
440A	S44002		312	309L/309Mo	
440B	S44003		312	309L/309Mo	
440C	S44004		312	309L/309Mo	

② 焊接参数。焊接时应选用较大的焊接电流，以增大热输入量，让接头缓慢冷却。防止焊后接头产生粗大硬脆的马氏体和应力集中而导致接头产生冷裂纹。焊条电弧焊焊接马氏体型不锈钢的焊接参数见表 6-5。

表 6-5　用焊条电弧焊焊接马氏体型不锈钢对接平焊的焊接参数[5]

板厚/mm	坡口形式	层数	坡口尺寸			焊接电流/A	焊接速度/(mm/mim)	焊条直径/mm	备注
			间隙 b/mm	钝边 p/mm	坡口角度 α/(°)				
3		2	2	—	—	80～110	100～140	3.2	背面清根
		1	3	—	—	110～150	150～200	4.0	垫板
		2	2	—	—	90～110	140～160	3.2	—

续表

板厚/mm	坡口形式	层数	坡口尺寸			焊接电流/A	焊接速度/(mm/mim)	焊条直径/mm	备注
			间隙 b/mm	钝边 p/mm	坡口角度 α/(°)				
5		2	3	—	—	80～110	120～140	3.2	背面清根
		2	4	—	—	120～150	140～180	4.0	垫板
		2	2	2	75	90～110	140～180	3.2	—
6		4	0	2	80	90～140	160～180	3.2,4.0	背面清根
		2	4	—	60	140～180	140～150	4.0,5.0	垫板
		3	2	—	75	90～140	140～160	3.2,4.0	—
9		4	0	2	80	130～140	140～160	4.0	背面清根
		3	4	—	60	140～180	140～160	4.0,5.0	垫板
		4	2	2	75	90～140	140～160	3.2,4.0	—
12		5	0	4	80	140～180	120～180	4.0,5.0	背面清根
		4	4	—	60	140～180	120～160	4.0,5.0	垫板
		4	2	2	75	90～140	130～160	3.2,4.0	—
16		7	0	6	80	140～180	120～180	4.0,5.0	背面清根
		6	4	—	60	140～180	110～160	4.0,5.0	垫板
		7	2	2	75	90～180	110～160	3.2,4.0,5.0	—
22		7	0	—	60	140～180	130～180	4.0,5.0	背面清根
		9	4	—	45	160～200	110～170	5.0	垫板
		10	2	2	45	90～180	110～160	3.2,4.0,5.0	—
32		14	—	—	70	160～200	140～170	5.0	背面清根

(2) 气体保护焊

① 非熔化极氩弧焊 (TIG)。该焊接方法焊接质量较好，常用于薄板焊接或多层焊打底焊。电极极性采用直流正接。由于裂纹倾向小，薄板焊前可不预热，厚板焊前需预热到120～200℃。一般选用与母材成分和组织相近的焊丝，以保证与母材匹配。国内马氏体型不锈钢焊丝选用见表 6-6，国外常见马氏体型不锈钢焊丝选用见表 6-7。

② CO_2 气体保护焊 (MAG)。马氏体型不锈钢采用 CO_2 气体保护焊时，其焊接接头含氢量低，冷裂纹倾向比焊条电弧焊小，可用较低的预热温度焊接，但需进行预热、后热和焊

后热处理。焊接材料选用见表 6-6、表 6-7。表 6-6 中的 Y308、Y309、Y410、Y410NiMo、Y430-P 等药芯不锈钢焊丝均为熔化极气体保护焊用焊丝，焊丝直径有 1.2mm、1.6mm 两种。上述药芯焊丝焊接时须采用 CO_2 气体保护，气体流量为 20～25L/min。

表 6-6　国内马氏体型不锈钢气体保护焊用焊丝[6,7]

钢号	实心焊丝	药芯焊丝(熔化极气体保护焊)	
	型号 符合 YB/T 5092	牌号	型号 符合 GB/T 17853
06Cr13(0Cr13) 20Cr13(2Cr13)	H12Cr13(H1Cr13) H12Cr24Ni13(H1Cr24Ni13) H12Cr26Ni21(H1Cr26Ni21)	Y308(YA102) Y308(YA107) (YG207-2) Y309(YA302-1)	E308T1-1 E308T1-1 — E309T1-1
12Cr17(1Cr17)	H10Cr17	Y430-P	E430T0 -1
14Cr17Ni2(1Cr17Ni2)	H12Cr13(H1Cr13) H12Cr24Ni13(H1Cr24Ni13)	Y410 Y309	E410T1 -1 E309T1 -1
0Cr13Ni5Mo	H06Cr12Ni4Mo ER410NiMo	Y410NiMo	E410NiMoT1-1

注：1. YB/T 5092 标准不包含 ER410NiMo 焊丝，它是 AWS A5.9 标准规定的焊丝。

2. 括号内的“牌号或型号”为旧标准钢材牌号或旧标准焊丝型号、牌号。

3. H12Cr13、H10Cr17 焊丝既可用于 MIG 焊接（做填充丝），也可用于 TIG 焊接。

表 6-7　国外马氏体型不锈钢焊丝的选用[6]

钢号			焊接材料型号		
AISI	UNS	德国钢号	第一选择	第二选择	第三选择
3Cr12			309L/309Mo	316L	308L
410	S41000	1.4006	410	309L/309Mo	310
414	S41400		410	309L/309Mo	310
415	S41500	1.4313	410	309L/309Mo	310
416	S41600		410	309L/309Mo	310
416Se	S41623		410	309L/309Mo	310
420	S42000		410	309L/309Mo	310
431	S43100	1.4057	430	308L/308	309
440A	S44002		312	309L/309Mo	
440B	S44003		312	309L/309Mo	
440C	S44004		312	309L/309Mo	

马氏体型不锈钢焊接用药芯焊丝型号及熔敷金属成分见表 6-8。马氏体型不锈钢埋弧焊、气体保护焊用焊丝型号及熔敷金属成分见表 6-9，其焊缝熔敷金属成分与药芯焊丝熔敷金属相比较，除了 Si、Cu、Mn 含量有些区别外，其他合金元素含量基本一致。

表 6-8　马氏体型不锈钢焊接用药芯焊丝型号及熔敷金属成分　%

焊丝型号 (GB/T 17853)	C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	P	S	Cu
E410T×-×	0.12	11.0～13.5	0.60	0.5	1.2	1.0	0.04	0.03	0.5

续表

焊丝型号（GB/T 17853）	C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	P	S	Cu
E410NiMoT×-×	0.06	11.0～12.5	4.0～5.0	0.40～0.70	1.0	1.0	0.04	0.03	0.5
E410NiTiT×-×	0.04	11.0～12.0	3.6～4.5	0.05	0.70	0.50	0.03	0.03	0.5

注：1. 我国的 GB/T 17853—1999《不锈钢药芯焊丝》标准的技术要求等效采用 AWS A5.22—95《电弧焊不锈钢药芯焊丝及钨极惰性气体保护焊不锈钢药芯填充焊丝规程》标准。

2. E410NiTiT×-×中，w_{Ti}为 10C～1.5%。

表 6-9 马氏体型不锈钢埋弧焊、气体保护焊用焊丝型号及熔敷金属成分 %

AWS	C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	P	S	Cu
ER410	0.12	11.0～13.5	0.60	0.75	0.6	0.50	0.03	0.03	0.75
ER410NiMo	0.06	11.0～12.5	4.0～5.0	0.40～0.70	0.6	0.50	0.03	0.03	0.75
ER420	0.25～0.40	12.0～14.0	0.6	0.75	0.6	0.50	0.03	0.03	0.75
ER502	0.10	4.6～6.0	0.6	0.45～0.65	0.6	0.50	0.03	0.03	0.75
ER505	0.10	8.0～10.5	0.5	0.8～1.2	0.6	0.50	0.03	0.03	0.75

注：1. 表中焊丝型号为美国 AWS A5.9—1981 中的埋弧焊和气体保护焊用焊丝。

2. ER410 为气体保护焊用焊丝，相当于我国 YB/T 5092—2005 标准的 H12Cr13 焊丝。

（3）埋弧焊

埋弧焊焊接材料可选用同质或异质焊缝的焊接材料（和焊条电焊选用焊条的原则相同）。焊剂采用碱性焊剂，如 SJ601 和 HJ151。国内常见埋弧焊用焊丝、焊剂见表 6-10。

表 6-10 国内常见埋弧焊用焊丝、焊剂

钢号	焊丝（符合 GB/T 17854）	焊剂型号（符合 GB/T 17854）	焊剂
06Cr13(0Cr13) 20Cr13(2Cr13)	H1Cr13 H0Cr21Ni10 H1Cr24Ni13 H1Cr26Ni21	F308-H0Cr21Ni10	SJ601
		F308-H0Cr21Ni10	HJ151
		F308-H0Cr21Ni10	HJ260
14Cr17Ni2(1Cr17Ni2)	H1Cr26Ni21 H1Cr24Ni13		SJ601 HJ151 HJ260

6.3 马氏体型不锈钢工程焊接实例

6.3.1 3Cr13 钢压力阀套的焊接[8]

1000t 试管机压力阀套的基体材料为 3Cr13 马氏体不锈钢锻件。由于采用了焊接结构，使压阀套具有体积小、重量轻、耐磨性良好的特点，并满足了技术性能的要求。

（1）阀套结构

1000t 试管机压力阀套由两部分组成，其结构形式及尺寸如图 6-1 所示。

（2）焊接工艺要点

① 坡口形式。为了使母材金属在焊接过程中获得一定的热量，并使焊件的冷却速度缓

慢，选择 V 形坡口，坡口形式及尺寸如图 6-2 所示。接头形式为锁底接头，对接焊缝。

② 预热和道间温度。预热采取整体预热工艺，预热温度和道间温度为 200～400℃。

③ 焊接方法与电极极性。采用焊条电弧焊，电源极性为直流反接。

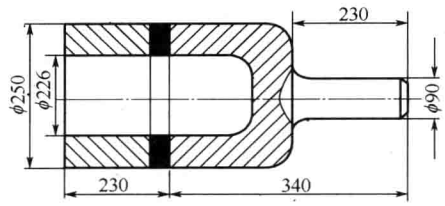


图 6-1　压力阀套的焊接结构形式及尺寸

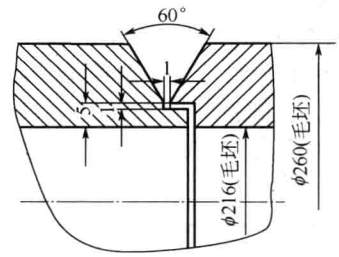


图 6-2　压力阀套焊接的坡口形式及尺寸

④ 装配定位焊。装配按图样要求，控制好装配间隙，预热后用直径 φ3.2mmE310 型（A402）焊条立即进行定位焊。及时检验定位焊缝质量，不允许存在裂纹等焊接缺陷。趁热进行正式焊。

⑤ 其他技术要求。采用多层多道连续焊，打底焊时焊接电流为 160A，以后各层的焊接电流可稍大些。焊接道间温度不得低于 200℃。焊接时，焊条不做摆动，但在熄弧时应稍作停留，以填满弧坑。每层和每道焊缝的起弧和收弧处要相互错开位置，不能在同一点上，以免影响焊接质量。焊接工作完毕后立即将焊件埋入石灰堆里，使其保温缓冷。

⑥ 检验。先进行目视外观检验，并做渗透无损检测，要求焊缝表面不得存在裂纹，然后进行 X 射线检测。

⑦ 焊后热处理。将焊件进行 730～790℃的炉中高温回火处理。

⑧ 焊件机械加工。焊后按图样进行机械加工，机加削除 V 形锁底接头的锁底部分的金属。

按照上述工艺要点焊接制造出的 3Cr13 钢压力阀套达到无超标焊接缺陷的质量，满足了产品技术性能指标。

6.3.2　煤仓漏斗 4Cr13 钢衬板的焊接[9]

（1）煤仓漏斗结构

洗煤厂的煤仓由 6 个圆台形漏斗组成，其结构如图 6-3 所示。漏斗的上口直径为 φ5940mm，下口直径为 φ1500mm，垂直高度为 5500mm 的两层钢板结构。外层为 6mm 厚的 Q235 钢板，内层为 6mm 厚的 4Cr13 马氏体不锈钢板，两层钢板之间采用塞焊工艺将它们连接起来。

（2）焊接性分析

4Cr13 是 Cr13 类马氏体不锈钢中含碳量较高的钢种。它的焊接性较差，焊接时的主要难点是焊接冷裂纹倾向比较大，且焊接接头容易淬火脆化，所以首先应进行抗裂性试验和模拟产品试板焊接试验，为产品制订合理的焊接工艺方案做好充分准备。

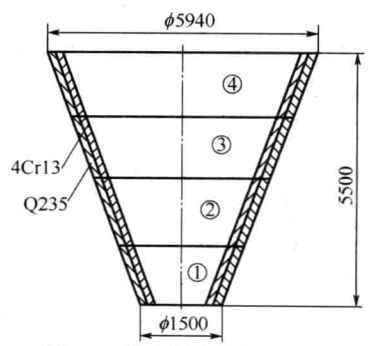


图 6-3　煤仓漏斗结构示意图

（3）焊接方法及焊材的选择

选用焊条电弧焊对煤仓漏斗进行焊接。漏斗要求在耐磨、耐蚀的条件下工作，焊缝为不承受重载荷的结构。焊条可选用与母材金属化学成分相当的 1Cr13 型不锈钢焊条，如选用 E410 型（G202、G207）焊条。但在焊缝和热

影响区都会产生硬化，冷裂纹倾向比较大。为了克服冷裂纹的形成，焊前必须进行高于300℃的焊前预热及焊后700℃左右的回火处理。但此工艺方案比较复杂，难以实现。

若选用E309（A302）和E310（A402）奥氏体不锈钢焊条，可使焊接接头得到较好的塑性来防止焊接时冷裂纹的产生。为此，对该类焊条进行了下列试验。

① 抗裂性试验按“斜y形坡口焊接裂纹试验方法”（GB 4675.1—1984）进行焊接性试验。除选用E309、E310型焊条外，还选用了镍合金焊条Ni317进行抗裂性试验，其试验结果见表6-11。试验结果表明：A402焊条的工艺性能及抗裂性良好。因此，可选用A402焊条在预热温度为150℃条件下进行产品模拟试验。

表6-11 几种焊条的抗裂性试验

焊条型号	焊条牌号	裂纹位置	裂纹率/%	
			不预热	预热150℃（硅酸铝保温）
E309	A307	表面	40	0
		断面	100	0
E310	A402	表面	0	0
		断面	35	0
	Ni317	表面	80	—
		断面	100	—

注：1. 试验时室温为5℃。

2. 保温材料用厚10mm硅酸铝板，焊前垫在试件下起缓冷作用。

3. Ni317焊条在不预热条件下施焊，焊后即发现裂纹，故未做其他试验。

② 产品模拟试验。进行对接焊缝试验。

a. 试件尺寸为600mm×300mm×6mm，开60°V形坡口，钝边为1.5mm，根部间隙为1mm±0.5mm。

b. 焊前用砂轮清除坡口及两侧各100mm范围内的油、锈等杂物。

c. 将焊接试件放在厚为10mm硅酸铝保温板上，用氧乙炔焰加热坡口两侧至150℃后进行施焊。

d. 采用ϕ4mm的A402焊条，焊前经150℃烘干1h，用直流电源反接法，焊接电流为105～110A。焊接顺序为先焊坡口背面，清根后再焊坡口正面。

e. 焊后放置24h后，对焊缝外观进行检验，未发现裂纹。

f. 沿焊缝纵向用滚床滚压到弯曲半径小于750mm时停止滚压。

g. 再进行焊缝外观检验及X射线检测，未发现新的焊接缺陷。

试验结果表明，该牌号焊条可以用于产品的焊接。为了使试件更接近产品的实际情况，又焊接了一组由6块4Cr13钢板（250mm×200mm×6mm）拼接成具有T形、十字形接头的对接焊缝的试件，焊后按产品的最小弯曲半径进行弯曲变形，结果仍未发现裂纹。这样就可以放心地用A402焊条对产品进行焊接了。

（4）衬板的焊接

根据设计图样要求，并考虑现场安装的条件，垂直高度为5500mm的漏斗是由两大节圆台形漏斗组成，并运至现场组装焊接。每一大节又由两小节组成（即图6-3中①、②为一大节，③、④为另一大节）。

正式投产前，选漏斗下部的一大节做产品试验，因该节曲率半径最小，焊接接头受力复杂，故选择以此做产品试验。其焊接工艺与产品模拟试验相同。坡口两侧120mm范围内的

预热采用远红外加热元件，并用半导体点温计测温。焊后经压弯成形，未发现裂纹。

为了更接近实际产品，在此试验基础上又用 600mm×300mm×6mm 的试件，开 I 形坡口，间隙留 2～3mm，在不预热的条件下进行定位焊和焊接试验。焊后进行压弯试验，未发现裂纹。应当指出的是，定位焊缝不宜太短，定位焊后应及时焊接，否则定位焊处有裂纹出现的可能性。

(5) 漏斗的组装焊接

漏斗 4Cr13 衬板与外层 Q235 钢板的组装焊接有两个工艺方案。

第一个工艺方案：衬板分片压形后与圆台形 Q235 钢板贴合，进行塞焊的方案。由于内、外层板不可能完全贴紧，给塞焊带来了困难，在生产中没有采用。

第二个工艺方案：将内、外钢板预先塞焊好成为双层钢板，然后进行压形工艺。此方案保证了两块钢板之间的贴合，同时由两次压形工艺合并为一次压形工艺，提高了工作效率。组装后的漏斗，焊接时应注意下列事项。

① 漏斗组装后，内衬纵缝间隙留 4mm±1mm，以保证焊透为准。当间隙过小时，应使用砂轮打磨坡口，然后才能进行定位焊。

纵焊缝错边量不大于 1mm，环焊缝的错边量不大于 2mm。

② 定位焊后立即检查焊缝外观质量，如发现有裂纹，应打磨消除后补定位焊缝，方可正式焊接。

③ 先焊 4Cr13 衬板的纵缝，后焊 Q235 钢板外层的纵焊缝。然后再焊两小节之间的环焊缝，最后将两大节圆台形漏斗运至现场进行组装焊接。

环焊缝采用分段对称焊的操作方法。

④ 内衬环焊缝焊前要用远红外加热器预热至 150℃，保温 5min，升温速度不大于 100℃/min。焊后需立即进行 250～300℃的后热处理，保温 5min 以上，停电冷却至 100℃以下时，去除加热器。

⑤ 焊接过程中若发现裂纹应立即停止施焊，待裂纹全部消除后，才能进行施焊。焊后若发现裂纹，则必须清除彻底后补焊，补焊前仍需采取预热和后热处理的措施。

总之，采用上述工艺方案，焊接成的漏斗已通过鉴定。这为采用耐蚀、耐磨、价格较低的 4Cr13 马氏体不锈钢焊接提供了生产经验。

6.3.3　发电机的复环与叶片焊接[1]

(1) 产品结构

图 6-4 为发电机复环叶片的焊接结构。其复环材质为 2Cr13，叶片为 1Cr13，均为马氏体不锈钢。

(2) 焊接工艺

① 焊前预热，温度为 250～300℃。

② 选用 A207（E316 型）焊条，其直径为 ϕ3.2mm。

③ 在引弧板上引弧，待电弧稳定后引入待焊处，采用短弧焊，收弧时要填满弧坑，减少弧坑裂纹，并使焊缝与母材金属呈圆滑过渡。

④ 焊后为防止焊件的变形和开裂，需进行回火热处理来消除焊接残余应力。回火温度为 700℃，保温 30min，然后空冷。

⑤ 用超声波探伤仪对焊缝内部进行检测，发现有超标焊接缺陷时，应立即返修。补焊工艺与焊接工艺相同，直至合格为止。

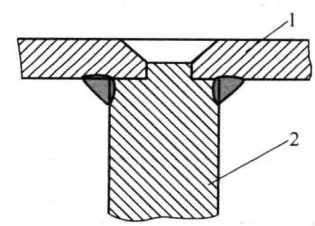


图 6-4　发电机复环叶片的焊接结构

1—复环；2—叶片

6.3.4 高温风机部件 Cr13 型不锈钢叶轮的修复[9]

叶轮尺寸：1570mm×447.5mm，底盘厚度为 10mm，叶片厚度为 6mm。叶轮失效形式：叶片断裂，叶片材质为 1Cr13。

焊接工艺：焊条电弧焊，焊前不预热，焊后不回火，采用对称短弧焊接，提高施焊环境温度。

焊接工艺参数：焊接电流 160～180A，焊接速度 150～200mm/min。

焊接材料：E309（A307）焊条，焊条直径 4.0mm。

修复效果：焊接接头做渗透检测未发现缺陷，运行两年多没有发现问题。

6.3.5 混流式水轮转轮的焊接[9]

转轮规格与尺寸：转轮最大直径为 6360mm，重量为 125t。转轮由分半上冠 13 个叶片及半下环拼焊组成整体。

转轮材质：ZG0Cr13Ni4Mo 低碳马氏体不锈钢，化学成分与力学性能分别见表 6-12 和表 6-13。

表 6-12 ZG0Cr13Ni4Mo 低碳马氏体不锈钢的化学成分 %

C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	S	P
≤0.06	≤1.00	≤1.00	11.5～13.5	4.00～5.00	0.40～1.0	≤0.030	≤0.030

表 6-13 ZG0Cr13Ni4Mo 低碳马氏体不锈钢的力学性能

$\sigma_{0.2}$/MPa	σ_b/MPa	δ/%	A_{kV}/J
550	760	15	50

焊接工艺；封底采用焊条电弧焊；其他焊缝采用富氩混合气体（Ar＋2%～4%CO_2）保护焊；焊前预热 100℃，道间温度 100～150℃，焊后回火热处理 500℃×8h。焊接参数列于表 6-14。

焊接材料：Cr16-Ni5-Mo1 合金体系的 HS367L 焊丝及配套焊条，熔敷金属的化学成分和力学性能分别列于表 6-15 和表 6-16，接头的力学性能列于表 6-17。

表 6-14 混流式水轮机焊接工艺参数

焊接方法	焊接材料规格 /mm	焊接电流 /A	电弧电压 /V	焊接速度 /(mm/min)
焊条电弧焊	4.0	150～170	—	150
气体保护焊	1.2	200～240	26～28	150～200

表 6-15 熔敷金属的化学成分 %

焊接材料	化学成分							
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	S	P
焊条	0.05	1.0	0.9	16.0～18.0	5.0～7.0	1.0	0.02	0.03
焊丝	0.03	1.5	0.9	15.5～17.0	5.0～6.5	1.5	0.02	0.03

表 6-16 熔敷金属的力学性能（经 590℃×8h 回火热处理）

焊接材料	力学性能			
	$\sigma_{0.2}$/MPa	σ_b/MPa	δ/%	A_{kV}/J
技术要求	≥550	≥760	≥15	≥50

续表

焊接材料	力学性能			
	$\sigma_{0.2}$/MPa	σ_b/MPa	δ/%	A_{kV}/J
焊条	760/765	935/960	17/17	—
焊丝	655/690	850/875	19/21	59、63、62

表 6-17　ZG0Cr13Ni4Mo 低碳马氏体不锈钢的焊接接头的力学性能

焊接材料	焊后热处理	接头横向拉伸		接头侧压弯头直径	焊缝冲击韧性 A_{kV}/J	热影响区 A_{kV}/J
		σ_b/MPa	断裂位置			
焊条	590℃×8h	830/870	母材	合格	50,56,52	90,92,96
焊丝	590℃×8h	840/840	母材	合格	62,68,76	60,82,96
技术要求	590℃×8h	700	—	侧弯 90°		27

参 考 文 献

[1] 张其枢，堵耀庭．不锈钢焊接．北京：机械工业出版社，2003.

[2] 吴树雄，尹士科编著．电焊条选用指南．第 2 版．北京：化学工业出版社，2002.

[3] GB/T 983—2012. 不锈钢焊条．

[4] 机械科学研究院哈尔滨焊接研究所．焊接材料产品手册．北京：机械工业出版社，2012.

[5] 付积和 等主编．焊接数据资料．北京：机械工业出版社，1994.

[6] 吴树雄，尹士科编著．焊丝选用指南．北京：化学工业出版社，2002.

[7] YB/T 5092—2005. 焊接用不锈钢丝．

[8] 魏自成．1000t 试管压力阀套的焊条电弧（手弧焊）．焊接，1988，(5)．

[9] 兰钧．煤仓漏斗 4Cr13 衬板焊接工艺．焊接，1985，(3).

第7章 双相不锈钢的焊接

7.1 双相不锈钢的焊接性

7.1.1 双相不锈钢简介

奥氏体-铁素体型不锈钢又称双相不锈钢，它的组织为铁素体加奥氏体，其体积分数约各占50%。双相不锈钢是将奥氏体不锈钢的优良韧性、较低的热裂倾向和良好的焊接性与铁素体不锈钢的较高强度、耐氯化物应力腐蚀性能以及焊后较低的脆化倾向结合在一起，使双相不锈钢兼有奥氏体不锈钢和铁素体不锈钢的优点。双相不锈钢耐氯化物应力腐蚀性能优于奥氏体不锈钢。另外它具有良好的抗孔蚀和缝隙腐蚀的能力，良好的耐腐蚀疲劳和磨损腐蚀性能，较好的耐点腐蚀性能，对晶间腐蚀不够敏感[1]。在力学性能方面具有较高的强度和疲劳强度，屈服强度是18-8型奥氏体不锈钢的两倍。

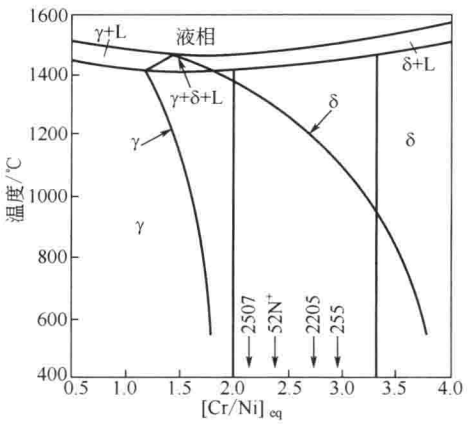


图7-1 Fe-Cr-Ni三元截面图（变种）[1]

2507—00Cr25Ni7Mo4N；52N+—00Cr25Ni6.5Mo3.5CuN；2205—00Cr22Ni57Mo3N；255—00Cr25Ni6Mo3CuN

双相不锈钢受热循环时，通常组织会发生变化。如图7-1所示，在1000℃以下平衡相比例为50%，50%左右的双相不锈钢，随着温度的升高，奥氏体逐步减少，而铁素体则逐步增多。被加热到1350℃以上至固相线温度区间，其平衡组织的体积分数为100%的铁素体。这样的物理冶金学本质是分析研究双相不锈钢焊接性的一个基本根据。当然，焊接性分析也一定要以焊接热循环、焊缝结晶特点为依据。焊接热循环的快速性和短暂性，决定了焊缝金属的相变对温度的滞后、相组成远远达不到平衡的程度。

双相不锈钢也具有铁素体型不锈钢的475℃脆性和在铁素体中析出σ相的脆化现象等不足之处[2~4]。

为了合理的确定焊接材料、焊接参数，下面对双相不锈钢的研发、发展及应用情况、国内外不锈钢对照情况做简要介绍。

我国双相不锈钢牌号和化学成分见表7-1，力学性能见表1-8，我国生产双相不锈钢的企业见表7-1，国外常见双相不锈钢牌号和化学成分见表7-2，中外双相不锈钢牌号对照见表7-3。

表 7-1　国产双相不锈钢牌号和化学成分[1,5~10]

牌号	化学成分(质量分数)/%											标准	生产厂家
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	N	其他元素		
14Cr18Ni11Si4AlTi (1Cr18Ni11Si4AlTi)	0.10~ 0.18	3.40~ 4.00	0.80	0.035	0.030	10.00~ 12.00	17.50~ 19.50	—	—	—	Ti:0.40~0.70 Al:0.10~0.30	①②③④	
022Cr19Ni5Mo3Si2N (00Cr18Ni5Mo3Si2)	0.030	1.30~ 2.00	1.00~ 2.00	0.035	0.030	4.50~ 5.50	18.00~ 19.50	2.50~ 3.00	—	0.05~ 0.12	—	①④	大连钢厂
	0.030	1.30~ 2.00	1.00~ 2.00	0.030	0.030	4.50~ 5.50	18.00~ 19.50	2.50~ 3.00	—	0.05~ 0.12	—	②③	
	0.030	1.30~ 2.00	1.00~ 2.00	0.035	0.030	4.50~ 5.50	18.00~ 19.50	2.50~ 3.00	—	0.05~ 0.10		⑤	
	0.030	1.40~ 2.00	1.20~ 2.00	0.030	0.030	4.30~ 5.20	18.00~ 19.50	2.50~ 3.00	—	0.05~ 0.10		⑥	
12Cr21Ni5Ti (1Cr21Ni5Ti)	0.09~ 0.14	0.80	0.80	0.035	0.030	4.80~ 5.80	20.00~ 22.00	—	—	—	Ti:5(C−0.02)~ 0.80	②③④⑥	
022Cr22Ni5Mo3N (00Cr22Ni5Mo3N)	0.030	1.00	2.00	0.030	0.020	4.50~ 6.50	21.00~ 23.00	2.50~ 3.50	—	0.08~ 0.20	—	①②③④⑤⑥	上钢五厂
022Cr23Ni5Mo3N	0.030	1.00	2.00	0.030	0.020	4.50~ 6.50	22.00~ 23.00	3.00~ 3.50	—	0.14~ 0.20	—	①②③④⑤⑥	
022Cr23Ni4MoCuN	0.030	1.00	2.50	0.040	0.030	3.00~ 5.50	21.50~ 24.50	0.05~ 0.60	0.05~ 0.60	0.05~ 0.20	—	②③	
	0.030	1.00	2.50	0.035	0.030	3.00~ 5.50	21.50~ 24.50	0.05~ 0.60	0.05~ 0.60	0.05~ 0.20	—	④⑤⑥	
022Cr24Ni7Mo4CuN	0.030	0.80	1.50	0.035	0.020	5.50~ 8.00	23.00~ 25.50	3.00~ 5.00	0.50~ 0.35	0.20~ 0.35		⑥	

续表

牌号	化学成分(质量分数)/%											标准	生产厂家
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	N	其他元素		
022Cr25Ni6Mo2N (00Cr25Ni6Mo2N)	0.030	1.00	2.00	0.035	0.030	5.50～6.50	24.00～26.00	1.20～2.50	—	0.10～0.20	—	①	长城钢铁公司
	0.030	1.00	2.00	0.030	0.030	5.50～6.50	24.00～26.00	1.50～2.50	—	0.10～0.20	—	②③	
	0.030	1.00	2.00	0.030	0.030	5.50～6.50	24.00～26.00	1.20～2.50	—	0.10～0.20	—	④⑤⑥	
03Cr25Ni6Mo3Cu2N	0.04	1.00	1.50	0.035	0.030	4.50～6.50	24.00～27.00	2.900～3.90	1.50～2.50	0.10～0.25	—	⑤⑥	
022Cr25Ni7Mo3WCuN	0.030	0.75	1.00	0.030	0.030	5.50～7.50	24.00～26.00	2.500～3.50	0.20～0.80	0.10～0.30	W：0.10～0.50	⑤⑥	
022Cr25Ni7Mo4N	0.030	0.80	1.20	0.035	0.020	6.00～8.00	24.00～26.00	3.00～5.00	0.50	0.24～0.32		⑤⑥	
022Cr25Ni7Mo4WCuN[a]	0.030	1.00	1.00	0.030	0.010	6.00～8.00	24.00～26.00	3.00～4.00	0.50～1.00	0.20～0.30	W：0.50～1.00	⑤⑥	
06Cr26Ni4Mo2	0.08	0.75	1.00	0.035	0.030	2.50～5.00	23.00～28.00	1.00～2.00			—	⑥	
022Cr25Ni7Mo3WCuN (00Cr25Ni7Mo3WCuN)	0.030	1.00	1.00	0.030	0.010	6.00～8.00	24.00～26.00	3.00～4.00	0.50～1.00	0.20～0.30	W：0.50～1.00	②③	太原钢铁公司
	0.030	1.00	0.75	0.030	0.010	5.50～7.50	24.00～26.00	2.50～3.50	0.20～0.80	0.10～0.30	W：0.50～1.00	④	

a. 022Cr25Ni7Mo4CuN 中 Cr%＋3.3Mo%＋16N%≥40%。

① GB/T 1220—2007《不锈钢棒》。

② GB/T 3280—2007《不锈钢冷轧钢板和钢带》。

③ GB/T 4237—2007《不锈钢热轧钢板和钢带》。

④ GB/T 20878—2007《不锈钢和耐热钢牌号及化学成分》。

⑤ GB/T 21832—2008《奥氏体-铁素体型双相不锈钢焊接钢管》。

⑥ GB/T 21833—2008《奥氏体-铁素体型双相不锈钢无缝钢管》。

表 7-2　国外双相不锈钢牌号和化学成分[13]

牌号	化学成分(质量分数)/%											标准
	C	Si	Mn	P	S	N	Cr	Mo	Ni	Cu	W	
X2CrNiMo23-4	0.030	1.00	2.00	0.035	0.015	0.05～0.20	22.00～24.00	0.10～0.60	3.50～5.50		—	ISO 16143-1:2004
	0.030	1.00	2.00	0.035	0.015	0.05～0.20	22.00～24.00	0.10～0.60	3.50～5.50	0.10～0.60	—	ISO 16143-3:2005
X2CrNiN23-4,1.4362	0.030	1.00	2.00	0.035	0.015	0.05～0.20	22.00～24.00	0.10～0.60	3.50～5.50	0.10～0.60		EN 10028-7:2000 EN 10216-5:2004
X2CrNiMo23-4,1.4362	0.030	1.00	2.00	0.035	0.015	0.05～0.20	22.00～24.00	0.10～0.60	3.50～5.50	0.10～0.60		EN 10088-2:2005
X2CrNiMo23-4①,1.4362	0.030	1.00	2.00	0.035	0.015	0.05～0.20	22.00～24.00	0.10～0.60	3.50～5.50	0.10～0.60		EN 10297-2:2005
X2CrNiMo22-5-3	0.030	1.00	2.00	0.035	0.015	0.10～0.22	21.00～23.00	2.50～3.50	4.50～6.50		—	ISO 16143-1:2004 ISO 16143-3:2005
X2CrNiMoN22-5-3,1.4462	0.030	1.00	2.00	0.035	0.015	0.10～0.22	21.00～23.00	2.50～3.50	4.50～6.50			EN 10028-7:2000 EN 10088-2:2005 EN 10216-5:2004 EN 10297-2:2005
X2CrNiMoSi18-5-3,1.4424	0.030	1.40～2.00	1.20～2.00	0.035	0.015	0.05～0.10	18.00～19.00	2.50～3.00	4.50～5.20			EN 10216-5:2004 EN 10297-2:2005
X2CrNiMoCuN25-6-3	0.030	0.70	2.00	0.035	0.015	0.15～0.30	24.00～26.00	2.50～4.0	5.0～7.50	1.00～2.50		ISO 16143-1:2004
X2CrNiMoCuN25-6-3,1.4507	0.030	0.70	2.00	0.035	0.015	0.15～0.30	24.00～26.00	2.70～4.0	5.50～7.50	1.00～2.50		EN 10028-7:2000 EN 10216-5:2004 EN 10297-2:2005
X2CrNiMoN25-7-4	0.030	1.00	2.00	0.035	0.015	0.24～0.35	24.00～26.00	3.0～4.5	6.0～8.0			ISO 16143-1:2004 ISO 16143-3:2005
X2CrNiMoN25-7-4,1.4410	0.030	1.00	2.00	0.035	0.015	0.20～0.35	24.00～26.00	3.0～4.5	6.0～8.0			EN 10028-7:2000

续表

牌号	化学成分(质量分数)/%											标准
	C	Si	Mn	P	S	N	Cr	Mo	Ni	Cu	W	
X2CrNiMoN25-7-4,1.4410	0.030	1.00	2.00	0.035	0.015	0.20～0.35	24.00～26.00	3.0～4.5	6.0～8.0			EN 10216-5:2004
X2CrNiMoCuWN25-7-4	0.030	1.00	1.00	0.035	0.015	0.20～0.30	24.00～26.00	3.0～4.0	6.0～8.0	0.50～1.0	0.50～1.0	ISO 16143-1:2004
X2CrNiMoCuWN25-7-4,1.4501	0.030	1.00	1.00	0.035	0.015	0.20～0.30	24.00～26.00	3.0～4.0	6.0～8.0	0.50～1.0	0.50～1.0	EN 10216-5:2004 EN 10028-7:2000 EN 10297-2:2005
X3CrNiMoN25-7-2,1.4460	0.050	1.00	1.00	0.035	0.015 ②	0.05～0.20	22.00～24.00	0.10～0.60	3.5～5.5	0.10～0.60		EN 10297-2:2005
X2CrNiMoN29-7-2①,1.4477	0.030	0.50	0.80～1.50	0.030	0.015	0.30～0.40	28.00～30.00	1.50～2.60	5.8～7.5			EN 10297-2:2005
S31100	0.060	1.00	1.00	0.045	0.030		25.0～27.0		6.0～7.0	Ti:0.50		ASTM A276-05a
S31200	0.030	1.00	2.00	0.030	0.030	0.14～0.20	24.0～26.0		5.5～6.5	—	—	ASTM A789/A789M-05b
S31260	0.030	0.75	1.00	0.030	0.030	0.10～0.30	24.0～26.0		5.5～7.5	0.20～0.80	0.10～0.50	ASTM A789/A789M-05b
S31500	0.030	1.20～2.00	1.40～2.00	0.030	0.030	0.05～0.1	18.0～19.0	2.5～3.0	4.3～5.2	—	—	ASTM A789/A789M-05b
S31803	0.030	1.00	2.00	0.030	0.020	0.08～0.20	21.0～23.0	2.5～3.5	4.5～6.5			ASTM A276-05a ASTM A479/A479M-05a ASTM A789/A789M-05b
S32001	0.030	1.00	4.00～6.00	0.040	0.030	0.05～0.17	19.5～21.5	0.60	1.0～3.0	1.00		ASTM A789/A789M-05b

续表

牌号	化学成分(质量分数)/%											标准
	C	Si	Mn	P	S	N	Cr	Mo	Ni	Cu	W	
S32003	0.030	1.00	2.00	0.030	0.020	0.14～0.20	19.5～22.5	1.50～2.00	3.0～4.0	—	—	ASTM A789/A789M-05b
S32101	0.040	1.00	4.0～6.0	0.040	0.030	0.20～0.25	21.0～22.0	0.10～0.80	1.35～1.70	0.10～0.80		ASTM A276-05a ASTM A479/A479M-05a ASTM A789/A789M-05b
S32205	0.030	1.00	2.00	0.030	0.020	0.14～0.20	22.0～23.0	3.0～3.5	4.5～6.5			ASTM A276-05a ASTM A479/A479M-05a ASTM A789/A789M-05b
S32304	0.030	1.00	2.50	0.040	0.030	0.05～0.20	21.5～24.5	0.05～0.60	3.0～5.5	0.05～0.60		ASTM A276-05a
S32304	0.030	1.00	2.50	0.040	0.040	0.05～0.20	21.5～24.5	0.05～0.60	3.0～5.5	0.05～0.60		ASTM A789/A789M-05b
S32506	0.030	0.90	1.00	0.040	0.015	0.08～0.20	24.0～26.0	3.0～3.5	5.5～7.2		0.05～0.30	ASTM A276-05a ASTM A479/A479M-05a
S32520	0.030	0.80	1.50	0.035	0.020	0.20～0.35	24.0～26.0	3.0～4.0	5.5～8.0	0.50～2.00		ASTM A240/A240M-05a
S32520	0.030	0.80	1.50	0.035	0.020	0.20～0.35	23.0～25.0	3～5	5.5～8.0	0.50～3.0	—	ASTM A789/A789M-05b
S32550	0.040	1.00	1.50	0.040	0.030	0.10～0.25	24.0～27.0	2.9～3.9	4.5～6.5	1.50～2.5		ASTM A276-05a ASTM A479/A479M-05a ASTM A789/A789M-05b
S32550 255	0.040	1.00	1.50	0.040	0.030	0.10～0.25	24.0～27.0	2.9～3.9	4.5～6.5	1.50～2.5		ASTM A240/A240M-05a
S32707	0.030	0.50	1.50	0.035	0.010	0.30～0.50	26.0～29.0	4.0～5.0	5.5～9.5	1.0		ASTM A789/A789M-05b

续表

牌号	化学成分(质量分数)/%											标准
	C	Si	Mn	P	S	N	Cr	Mo	Ni	Cu	W	
S32750 2507	0.030	0.80	1.20	0.035	0.020	0.24～ 0.32	24.0～ 26.0	3.0～ 5.0	6.0～ 8.0	0.50		ASTM A240/A240M-05a
S32750	0.030	0.80	1.20	0.035	0.020	0.24～ 0.32	24.0～ 26.0	3.0～ 5.0	6.0～ 8.0	0.50		ASTM A789/A789M-05b
S32760③	0.030	1.00	1.00	0.030	0.010	0.20～ 0.30	24.0～ 26.0	3.0～ 4.0	6.0～ 8.0	0.50～ 1.00	0.5～ 1.00	ASTM A276-05a ASTM A479/A479M-05a
S32760	0.030	1.00	1.00	0.030	0.010	0.20～ 0.30	24.0～ 26.0	3.0～ 4.0	6.0～ 8.0	0.5～ 1.00	1.50～ 2.5	ASTM A240/A240M-05a
S32760	0.05	1.00	1.00	0.030	0.010	0.20～ 0.30	24.0～ 26.0	3.0～ 4.0	6.0～ 8.0	0.5～ 1.00	1.50～ 2.5	ASTM A789/A789M-05b
S32808	0.030	0.50	1.10	0.030	0.030	0.30～ 0.40	27.0～ 27.9	0.80～ 1.20	7.0～ 8.2		2.10～ 2.5	ASTM A789/A789M-05b
S32900 329	0.08	0.75	1.00	0.040	0.030	—	23.0～ 28.0	1.00～ 2.00	2.0～ 5.0	—	—	ASTM A240/A240M-05a
S32900	0.08	0.75	1.00	0.040	0.030	—	23.0～ 28.0	1.00～ 2.00	2.5～ 5.0	—	—	ASTM A789/A789M-05b
S32906	0.030	0.50	0.80～ 1.50	0.030	0.030	0.30～ 0.40	28.0～ 30.0	1.50～ 2.60	5.8～ 7.5	0.80		ASTM A479/A479M-05a
S32906	0.030	0.80	0.80～ 1.50	0.030	0.030	0.30～ 0.40	28.0～ 30.0	1.50～ 2.60	5.8～ 7.5	0.80		ASTM A789/A789M-05b
S32950	0.030	0.60	2.00	0.035	0.010	0.15～ 0.35	26.0～ 29.0	1.00～ 2.50	3.5～ 5.2	—	—	ASTM A479/A479M-05a ASTM A240/A240M-05a

续表

牌号	化学成分(质量分数)/%											标准
	C	Si	Mn	P	S	N	Cr	Mo	Ni	Cu	W	
S32950	0.030	0.60	2.00	0.035	0.010	0.15～0.35	26.0～29.0	1.00～2.50	3.5～5.2	—	—	ASTM A789/A789M-05b
S39274	0.030	0.80	1.00	0.030	0.020	0.24～0.32	24.0～26.0	2.5～3.5	6.0～8.0	0.20～0.80	1.50～2.50	ASTM A789/A789M-05b
S39277	0.025	0.80	0.80	0.025	0.002	0.23～0.33	24.0～26.0	3.0～4.0	6.5～8.0	1.20～2.00	0.80～1.20	ASTM A479/A479M-05a ASTM A789/A789M-05b
SUS329J1	0.08	1.00	1.50	0.040	0.030	—	23.0～28.0	1.00～3.00	3.00～6.00			JIS G 4303—2005, JIS G 4304—2005 JIS G4305—2005
SUS329J3L	0.030	1.00	2.00	0.040	0.030	0.08～0.20	21.0～24.0	2.50～3.50	4.50～6.50	—	—	JIS G 4303—2005, JIS G 4304—2005 JIS G4305—2005
SUS329J4L	0.030	1.00	1.50	0.040	0.030	0.08～0.30	24.0～26.0	2.50～3.50	5.50～7.50			JIS G 4303—2005, JIS G 4304—2005 JIS G4305—2005
SUS329J1TB	0.08	1.00	1.50	0.040	0.030	—	23.0～28.0	1.00～3.00	3.00～6.00			JIS G3463—1994
SUS329J3LTB	0.030	1.00	1.50	0.040	0.030	0.08～0.20	21.0～24.0	2.50～3.50	4.500～6.50			JIS G3463—1994
SUS329J4LTB	0.030	1.00	1.50	0.040	0.030	0.08～0.30	24.0～26.0	2.50～3.50	5.50～7.50			JIS G3463—1994

① 专利牌号。

② 硫可控制范围为 0.015%～0.030%。

③ Cr+3.3Mo+16N≥40。

表 7-3　中外各标准中双相不锈钢牌号对照[9,10]

中国		美国	欧洲	国际	日本	前苏联	原习惯用牌号
GB/T 20878 中的牌号	GB/T 21832—2008 GB/T 21833—2008	ASTM A789M-05b ASTM A790-05a	EN 10216-7:2004 EN 10217-7:2005	ISO 15156-3:2003	JIS G3459:2004 JIS G3463:2006	ГОСТ 5632—1972	
022Cr18Ni5Mo3Si2N	022Cr19Ni5Mo3Si2N①	S31500	X2CrNiMoSi18-5-3 1.4424 —				00Cr18Ni5Mo3Si2N, 3RE60
12Cr21Ni5Ti	— 12Cr21Ni5Ti					12X21H5T	1Cr21Ni5Ti,ЭИ811
022Cr22Ni5Mo3N	022Cr22Ni5Mo3N	S31803	X2CrNiMoN22-5-3 1.4462	S31803/2205	SUS329J3LTP SUS329J3LTB		00Cr22Ni5Mo3N,2205
022Cr23Ni5Mo3N	022Cr23Ni5Mo3N	S32205					00Cr22Ni5Mo3N,2205
022Cr23Ni4MoCuN	022Cr23Ni4MoCuN	S32304	X2CrNiMoN23-4 1.4362				00Cr23Ni4N
022Cr25Ni6Mo2N	022Cr25Ni6Mo2N①	S31200		S31200/44LN			00Cr25Ni6Mo2N
022Cr25Ni7Mo3WCuN	022Cr25Ni7Mo3WCuN	S31260			SUS329J4LTP SUS329J4LTB		00Cr25Ni7Mo3WCuN
03Cr25Ni6Mo3Cu2N	03Cr25Ni6Mo3Cu2N	S32550		S32550/255			0Cr25Ni6Mo3Cu2N FERRALIUM alloy 255
022Cr25Ni7Mo4N	022Cr25Ni7Mo4N	S32750	X2CrNiMoN25-7-4 1.4410	S32750/2507			00Cr25Ni7Mo4N, 2507
022Cr25Ni7Mo4WCuN	022Cr25Ni7Mo4WCuN	S32760	X2CrNiMoCuWN25-7-4 1.4501	S32760a/Z100			0Cr25Ni7Mo4WCuN, Zeron100
	— 06Cr26Ni4Mo2	S32900			SUS329J1LTP		0Cr26Ni5Mo2
	— 022Cr24Ni7Mo4CuN	S32520	X2CrNiMoCuN25-6-3 1.4507	S32520/52N+			00Cr25Ni7Mo4CuN,UR52N+

① 属于 GB/T 21833 标准的注释，含义为：本牌号的化学成分规定与 GB/T 20878 中对应的化学成分规定不一致，个别元素加严了要求。

表 7-2 中的标准名称说明：

① ISO 16143-3：2005 是 ISO 16143-3：2005《一般用不锈钢　第 3 部分：钢丝》的缩略语。

② ISO 16143-1：2004 是 ISO 16143-1：2004《一般用不锈钢　第 1 部分：扁平产品》的缩略语。

③ EN 10088-2：2005 是 EN 10088-2：2005《不锈钢　第 2 部分：一般用不锈钢薄板、厚板和钢带》的缩略语。

④ EN 10028-7：2000 是 EN 10028-7：2000《承压设备不锈钢扁平产品》的缩略语。

⑤ EN 10216-5：2004 是 EN 10216-5：2004《在室温、低温或高温下供承压和耐腐蚀用奥氏体、奥氏体-铁素体不锈钢（包括抗蠕变钢）圆形无缝钢管》的缩略语。

⑥ EN 10297-2：2005 是 EN 10297-2：2005《机械结构和一般工程用不锈钢圆形无缝钢管》的缩略语。

⑦ ASTM A276-05a《不锈钢棒材和型材》。

⑧ ASTM A789/A789M-05b《一般用无缝和焊接铁素体/奥氏体不锈钢管》。

⑨ ASTM A479/A479M-05a《锅炉和其他压力容器用不锈钢棒材和型材》。

⑩ ASTM A240/A240M-05a《承压和一般用铬和铬-镍不锈钢厚板、薄板和钢带》。

⑪ JIS G4303—2005《不锈钢棒》。

⑫ JIS G4304—2005《不锈钢热轧厚板、薄板和钢带》。

⑬ JIS G4305—2005《不锈钢冷轧厚板、薄板和钢带》。

⑭ JIS G3463—1994《锅炉和热交换器用不锈钢管》。

（1）Cr18 型双相不锈钢简介

① Cr18 型双相不锈钢发展概况。我国 Cr18 型双相不锈钢的牌号有 022Cr19Ni5Mo3Si2N 和 14Cr18Ni11Si4AlTi（1Cr18Ni11Si4AlTi）两种。Cr18 型双相不锈钢最早由瑞典在 20 世纪 60 年代初期开发成功，其牌号为 3RE60。Cr18 型的双相不锈钢是目前合金元素含量最低的双相不锈钢，是可焊性良好的耐应力腐蚀钢种，它在氯化物介质中的耐孔蚀性能同 317L 相当，耐中性氯化物应力腐蚀性能显著优于普通 18-8 型奥氏体不锈钢，用于承受较低应力（$\leqslant\sigma_{0.2}$）和较低浓度氯化物条件下的设备和部件，尤其耐以孔蚀为起源的应力腐蚀效果显著，它有较好的强度-韧性综合性能、冷热加工工艺性能及焊接性能，适用作结构材料。

② 022Cr18Ni5Mo3Si2N 双相不锈钢简介。022Cr18Ni5Mo3Si2N（原习惯牌号为 00Cr18Ni5Mo3Si2N，3RE60）已纳入 GB/T 1220、GB/T 3280、GB/T 4237、GB/T 20878、GB/T 21832、GB/T 21833 等标准中。它属于 Cr18 型双相不锈钢，该牌号材料包括钢棒、钢板、无缝钢管、焊接钢管等。该钢耐应力腐蚀，相当于瑞典的 3RE60 双相不锈钢，对应的欧洲 EN 10216-7 和 EN 10217-7 标准牌号为 X2CrNiMoSi18-5-3[1]，1.4424[1]。20 世纪 60 年代初期瑞典开发出 3RE60 钢，该钢由瑞典 Sandvik 厂生产，它用于纸浆和造纸工业。20 世纪 70 年代初，中国在 3RE60 钢的基础上加入 0.06%～0.10%的氮，调整了焊接热影响区（HAZ）的铁素体相与奥氏体相的比例，进一步改进了钢的耐应力腐蚀破裂（SCC）性能，使 00Cr18Ni5Mo3Si2 钢在中国得到了大量的推广应用。

中国 Cr18 型双相不锈钢化学成分见表 7-1，美国、日本、欧洲的 Cr18 型双相不锈钢化学成分见表 7-2，瑞典的 3RE60 双相不锈钢化学成分见表 7-4。

[1] 材料牌号的含义见本书第 1 章。

表 7-4 3RE60 双相不锈钢的化学成分[1] %

C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo
0.03	1.4～2.0	1.2～2.0	0.03	0.03	18.0～19.0	4.25～5.25	2.5～3.0

③ 022Cr19Ni5Mo3Si2N 钢性能。022Cr19Ni5Mo3Si2N 钢为超低碳双相不锈钢，该钢中碳含量很低，铬的含量也不多，形成 475℃脆性和 σ 相脆化的可能性不大，其双相组织的比例相对稳定。如果将它长期加热，因钢中含有钼和硅合金元素，仍有出现 σ 相脆化和 475℃脆性的可能，可通过 980℃固溶处理恢复到钢原来的相比例。该钢与奥氏体型不锈钢相比，具有较低的焊接热裂纹倾向；与铁素体型不锈钢相比，焊后脆化倾向较低，具有良好的焊接性。但是，在焊接热影响区中会出现单相铁素体组织，对焊接接头耐应力腐蚀、晶间腐蚀和力学性能均有影响。

④ Cr18 型双相不锈钢用途。无论是瑞典的 3RE60 钢，还是国内的 022Cr19Ni5Mo3Si2N 钢都得到了广泛的应用，主要用在纸浆和造纸、炼油、化肥、化工和石油化工等工业领域，大多数用于制造热交换器、冷凝冷却器等，许多情况是代替 304 钢和 316 钢在应力腐蚀的环境下使用的；也有利用双相不锈钢的高腐蚀疲劳强度，如用于制造纸压力滚筒机、甲铵泵泵体等，也有用它与碳钢相近的线胀系数，如制造合成甲醇厂的管式反应器等。022Cr19Ni5Mo3Si2N（00Cr18Ni5Mo3Si2）钢在甲铵液中也有比 316L（尿素级）钢更好的耐腐蚀疲劳性能，在小化肥厂多年的甲铵泵泵体使用实践证明，双相不锈钢有很好的耐低周腐蚀疲劳性能，可以代替 06Cr17Ni12Mo2Ti（0Cr18Ni12Mo3Ti）钢使用。

（2）Cr21 型双相不锈钢简介

目前列入国家标准的 Cr21 型双相不锈钢仅有 12Cr21Ni5Ti。

① 12Cr21Ni5Ti 双相不锈钢简介。12Cr21Ni5Ti（原牌号为 1Cr21Ni5Ti）已纳入 GB/T 1220、GB/T 3280、GB/T 4237、GB/T 20878、GB/T 21833 等标准中（化学成分见表 7-1）。该牌号材料包括钢棒、钢板、无缝钢管等。该钢最早由前苏联在 20 世纪 60 年代开发，1961 年纳入标准（ГОСТ5632—61），1972 年又对其进行了修订，ГОСТ5632—72 将 0Cr21Ni5Ti 钢的 Cr、Ni 含量提高，钢号改为 0Cr22Ni6Ti（化学成分见表 7-5），中国经研制后，1975 年纳入 GB 1220—75 标准，该钢种是为了节镍，代替 1Cr18Ni9Ti 而设计的，有较好的力学性能，特别是强度较高。

表 7-5 Cr21 型两种双相不锈钢的化学成分（质量分数）[1,6,7] %

钢种	标准	C	Si	Mn	P
08X22H6T	ГОСТ5632—72	≤0.08	≤0.8	≤0.8	≤0.035
10X21H5T	ГОСТ5632—72	0.09～0.14	≤0.8	≤0.8	≤0.035
12Cr21Ni5Ti（1Cr21Ni5Ti）	GB/T 3280—2007 GB/T 4237—2007	0.09～0.14	≤0.8	≤0.8	≤0.035
钢种	标准	S	Cr	Ni	Ti
08X22H6T	ГОСТ5632—72	≤0.025	21～23	5.3～6.3	0.3～0.6
10X21H5T	ГОСТ5632—72	≤0.035	20～22	4.8～5.8	0.25～0.5
12Cr21Ni5Ti（1Cr21Ni5Ti）	GB/T 3280—2007 GB/T 4237—2007	≤0.030	20～22	4.8～5.8	5(C－0.02)～0.8

② 12Cr21Ni5Ti 的化学成分和显微组织。Cr21 型化学成分见表 7-1 或表 7-5。此钢在 500～600℃短时加热出现脆性，这一温度范围与铁素体固溶体的弥散硬化温度范围［析出 $(Ni, Cr, Fe)_3$ (Ti, Al) 相］和铁素体固溶体的两相分离温度范围（475℃脆性）部分叠

加，有可能是这一温度范围强化效果最显著的原因；为了防止这一现象，采用控制钢中 Ti 不大于 0.5%，残余 Al 不大于 0.08%的方法，收到了明显的效果[1]。

经 950～1050℃固溶处理后，Cr21 型双相不锈钢中的铁素体量为 55%～70%。提高淬火温度，使铁素体量增多，当组织中奥氏体量不少于 20%～25%时仍为细晶组织，只有当奥氏体相消失时，晶粒才会粗化。由于两相组织阻止了晶粒急剧长大，因此在少量变形后再加热时，双相不锈钢没有晶粒急剧长大倾向，这也是这种类型钢的特征之一[1]。

Cr21 型双相不锈钢在 400～500℃范围内长期保温，出现 475℃脆性；600～750℃短期时效后的塑性降低是由于碳化物的析出而使合金元素贫化的奥氏体产生马氏体转变的结果；650～700℃长期保温的脆化则与 α 相的析出有关。

Cr21 型双相不锈钢中的奥氏体是亚稳定的，在冷变形过程中也会产生马氏体转变（γ-α_m），即使在小变形量后，饱和磁化强度也会显著增加，见表 7-6。但是加热到 150℃即可以抑制马氏体转变，这提供了采用温轧工艺以提高轧制变形量的条件。

表 7-6　冷变形量对 12Cr21Ni5Ti 钢饱和磁化强度的影响[1]

压下量 ε/%	$\pi I_s/G_s$	压下量 ε/%	$\pi I_s/G_s$
0	5700	16	11200
5	6100	30	11900
13	8200	53	13200

③ 12Cr21Ni5Ti 钢的性能。这类钢中增加了钛的含量，与 022Cr19Ni5Mo3Si2N 钢相比，提高了钢的耐晶间腐蚀能力和耐应力腐蚀的能力。由于这类钢中铬当量与镍当量的比值选择适当，在高温加热后仍能保留较大量的奥氏体组织，还能在冷却过程中生成二次奥氏体，结果钢中奥氏体总的体积分数不低于 30%～40%，使钢具有良好的耐晶间腐蚀的能力。

④ 12Cr21Ni5Ti 钢的用途。12Cr21Ni5Ti 代替 1Cr18Ni9Ti 钢使用，多用来制造既耐氧化性酸的腐蚀（例如硝酸），又要求有较高强度的设备和部件，用来制造化学工业、食品工业等耐酸腐蚀的容器和部件，特别适用于制造航空发动机壳体和火箭发动机燃烧室外壁。

（3）Cr22 型双相不锈钢简介

① Cr22 型双相不锈钢发展概况。瑞典继开发了 3RE60 双相不锈钢之后，针对酸性油井井管及管线用材又首先开发出了 SAF2205 钢（第二代双相不锈钢），美国将其纳入了 ASTM A789M、A790、A240、A276 等标准，美国牌号为 UNS S31803；20 世纪 80 年代以后，各国相继开发类似钢种，并纳入标准。欧洲 EN 10216-7 和 EN 10217-7 标准对应的牌号为 X2CrNiMoN23-5-3、1.4462，日本 JIS G3459 和 JIS G3463 标准的牌号分别为 SUSJ3LTP、SUS329J3LTB。法国有 Z2CND2205-03，瑞典有 SS2377，英国有 BS 318S13，德国有 W-Nr. 1.4462，DINX2CrNiMoN2253 等。

② 022Cr22Ni5Mo3N 双相不锈钢简介。022Cr22Ni5Mo3N（原牌号为 00Cr22Ni5Mo3N）已纳入 GB/T 1220、GB/T 3280、GB/T 4237、GB/T 20878、GB/T 21832、GB/T 21833 等标准中。该牌号材料包括钢棒、钢板、焊接钢管、无缝钢管等，化学成分见表 7-1，该钢相当于瑞典的 SAF2205 双相不锈钢（中国在 20 世纪 80 年代初开始试制相当于 SAF2205 钢的 00Cr22Ni5Mo3N）。

③ Cr22 型双相不锈钢的性能。Cr22 型双相不锈钢有良好的强度及韧性。钢中除了铬、镍耐腐蚀元素以外还含有一定量的抗孔蚀元素氮，所以该材料抗点腐蚀，SAF2304 钢的 CPT 值高于 304L，和 316L 相当。Cr22 型双相不锈钢可进行冷、热加工及成形，焊接性良好，适用作结构材料，是目前应用最普遍的双相不锈钢材料。

④ 022Cr22Ni5Mo3N 双相不锈钢的应用。022Cr22Ni5Mo3N 双相不锈钢广泛应用于石油、天然气的生产设备中，它在中性氯化物溶液和硫化氢中的耐应力腐蚀性能优于 304L、316L 奥氏体不锈钢及 18-5Mo 型双相不锈钢。

(4) Cr23 型双相不锈钢简介

① Cr23 型双相不锈钢发展概况。Cr23 型双相不锈钢是瑞典最先开发的双相不锈钢，不含钼，铬和镍的含量也较低，它具有双相不锈钢的共性特点。两相组织使其具有高的强度和耐应力腐蚀的性能，由于钢中含有 23%Cr，也有很好的耐孔蚀、缝隙腐蚀和均匀腐蚀的性能，它是作为一个具有高强度和价廉特色，能代替 304L 和 316L 常用奥氏体不锈钢而开发的钢种。它已被美国机械工程学会（ASME）确认可用于锅炉和压力容器，化工和炼油厂的管道。不少国家或地区已纳入标准，如美国的 UNSS32304，法国的 Z3CN23-04AZ，瑞典的 SS2327（Sandvik 和 Avesta 厂使用的牌号是 SAF2304），欧洲 EN 10216-7 和 EN 10217-7 标准的牌号为 X2CrNiN23-4，1.4362。

② 022Cr23Ni4MoCuN 双相不锈钢简介。022Cr23Ni4MoCuN（原习惯牌号为 00Cr23Ni4N，相当于瑞典的 SS2327）已纳入 GB/T 3280、GB/T 4237、GB/T 20878、GB/T 24511、GB/T 21832、GB/T 21833 等标准中。该牌号材料包括钢板、焊接钢管、无缝钢管等，化学成分见表 7-1。

③ SAF2304 钢简介。瑞典的 SAF2304 钢典型的化学成分见表 7-7，成分平衡的较好，铁素体和奥氏体相约各占一半，固溶处理温度为 1000℃左右，经此处理后，组织有 40%～50%铁素体和 60%～50%奥氏体。奥氏体相稳定。焊接后在 HAZ 能再形成奥氏体，从而保证与母材相当的力学性能和耐腐蚀性能。

表 7-7 SAF2304 双相不锈钢的化学成分（质量分数）[1] %

钢种	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	N
SAF2304	0.03	0.5	1.2	0.04	0.04	23	4.5	0.1

SAF2304 钢钢管和钢板的室温力学性能、高温力学性能分别见表 7-8、表 7-9。双相不锈钢有很高的屈服强度，晶粒较细，两相组织也阻碍晶粒长大；细晶粒有利于提高钢的强度，同时又保持较高的韧性。

表 7-8 SAF2304 双相不锈钢的室温力学性能

钢种	钢材品种	R_m/MPa	$R_{p0.2}$/MPa	A/%	A_k/J
SAF2304	钢管(外径≤25.4mm)	≥690	≥450	≥25	
	钢板	600	≥400	≥25	≥100

表 7-9 SAF2304 双相不锈钢的高温力学性能

钢号	钢材品种	温度/℃	R_m/MPa	$R_{P0.2}$/MPa
SAF2304	钢板	50	600	370
		100	570	330
		200	530	290
		300	500	260

由于 SAF2304 钢仍有铁素体不锈钢的特征，会产生 475℃脆性，不宜在 300℃以上长时间加热，否则会导致韧性下降。

④ 022Cr23Ni5Mo3N 双相不锈钢简介。022Cr23Ni5Mo3N（原习惯牌号为 00Cr22Ni5Mo3N，2205）已纳入 GB/T 1220、GB/T 3280、GB/T 4237、GB/T 20878、GB/T 21832、GB/T 21833 等标准中。该牌号材料包括钢棒部、钢板、焊接钢管、无缝钢管等。它是 ASTM A789M 中的 S31803（美国 ASTM A789M 在 2001 版增加了 S32205）的改进升级牌号。该牌号与 S31803 相比，提高了 Cr、Mo、N 含量的下限。

（5）022Cr24Ni7Mo4CuN 双相不锈钢简介

022Cr24Ni7Mo4CuN（原习惯牌号为 00Cr24Ni7Mo4CuN，UR52N$^+$）已纳 GB/T 21833 标准中，化学成分见表 7-1。已查到的国内材料标准仅有管材。该牌号材料是法国 Creusot-Loire Industrie（CLI）公司开发的产品，商业牌号为 UR52N$^+$，美国将 UR52N+纳入 ASTM A789M、ASTM A790 标准（牌号为 S32520，化学成分见表 7-2）。022Cr24Ni7Mo4CuN 与欧洲 EN 10216-7：2004 标准的牌号为 X2CrNiMoCuN25-6-3、1.4507 不锈钢相近似。该牌号双相不锈钢的应用范围很广，如在环保湿法烟气脱硫系统中用于制造吸收塔及部分洗涤塔内件等，在欧洲大量使用。

（6）Cr25 型双相不锈钢简介

① Cr25 型双相不锈钢发展概况。Cr25 型双相不锈钢包括英国 Bonar-Langley Alloy Limited 公司开发的 FERRALIUM alloy255（255 合金），英国 Mather and Platt ltd 公司开发的 Zeron100 钢（美国 UNS 牌号为 S3276），英国发展的 Zeron25（铸）双相不锈钢；日本金属公司开发的 NTKR-4 双相不锈钢，日本住友金属公司和日本不锈钢工业公司开发的 DP3 双相不锈钢；美国开发的 7-MoPLUS 钢等；瑞典 SANDVIK 司开发的 SAF2507 钢（美国 UNS 牌号为 S32750）；日本在 1972 年将 SUS329J1 钢纳入了 JIS 工业标准。中国针对尿素用钢的要求发展了类似 NTKR-4 钢的 00Cr26Ni5Mo2N 钢，并纳入我国国家标准。纳入我国国家标准的双相不锈钢还有 022Cr25Ni7Mo4N、022Cr25Ni6Mo2N、022Cr25Ni7Mo3WCuN、03Cr25Ni6Mo3Cu2N、022Cr25Ni7Mo4WCuN 等牌号。

英国的 Zeron100 钢，美国 UNS 牌号为 S3276、S32750，瑞典的 SAF2507 钢等双相不锈钢均为超级双相不锈钢。所谓超级双相不锈钢是指 PREN（PREN＝Cr%＋3.3Mo%＋16N%）大于 40，含 25%Cr 和高钼（大于 3.5%）、高氮（0.22%～0.30%）的钢。

② 022Cr25Ni6Mo2N 双相不锈钢简介。022Cr25Ni6Mo2N（原习惯牌号为 00Cr25Ni6Mo2N）已纳入 GB/T 1220、GB/T 3280、GB/T 4237、GB/T 20878、GB/T 21832、GB/T 21833 等标准中。该牌号材料为尿素用钢，包括钢板、焊接钢管、无缝钢管等。化学成分见表 7-1。该材料与国外接近的双相不锈钢有日本的 SUS329J1 钢（日本在 1972 年将 SUS329J1 纳入 JIS 标准），日本金属 NTKR-4 钢，英国的 Zeron25 钢（铸），美国的 7-MoPLVS 钢，美国 ASTM A789M、ASTM A790 标准中牌号为 S31200 钢。

022Cr26Ni5Mo2N、SUS 329J1 双相不锈钢的耐腐蚀疲劳性能远比 316L（尿素级）钢好，这对在低应力、低频率交变载荷条件下工作的尿素甲铵泵泵体选材有重要的参考价值。为了便于比对，将中国的 022Cr26Ni6Mo2N，日本的 SUS 329J1、NTKR-4 等双相不锈钢化学成分，列入表 7-10 中。

表 7-10　NTKR-4 等钢材的化学成分（质量分数）[1,5,8～10]　　%

牌号	C	Si	Mn	S	P
022Cr25Ni6Mo2N	≤0.03	1.00	2.00	≤0.03	≤0.030
NTKR-4	≤0.03	1.0	1.0	≤0.03	≤0.035
SUS 329J1	≤0.08	1.0	1.5	≤0.040	≤0.030

续表

牌号	Cr	Ni	Mo	N
022Cr25Ni6Mo2N	24.0～26.0	5.5～6.5	1.5～2.5	0.10～0.20
NTKR-4	23.0～26.0	4.0～6.0	1.0～2.5	加
SUS 329J1	23.0～28.0	3.00～6.00	1.00～3.00	

022Cr25Ni5Mo2N 钢中 w_{Mo} 为 1%～3%，可提高双相不锈钢耐点腐蚀和缝隙腐蚀的能力，但是钼的加入会使这类钢具有明显的 475℃脆性，也有 σ 相形成的倾向。固溶温度低于 1000℃时，有可能出现 σ 相脆化，将降低其冲击韧性。

NTKR-4 等双相不锈钢焊缝金属和焊接接头力学性能分别见表 7-11 和表 7-12。

表 7-11 NTKR-4 双相不锈钢焊缝金属的力学性能[1]

焊接方法	状态	R_m/MPa	A/%	A_{kV}/J
GTAW	焊态	760	23	74
SMAW	焊态	820	26	50

注：表中的冲击试验数据为－20℃夏比 V 形缺口冲击试验。

表 7-12 NTKR-4 双相不锈钢焊接接头力学性能[1]

焊接方法	板厚/mm	状态	R_m/MPa	A_{kV}/J	
				焊缝	HAZ
GTAW	10	焊接态	760	70	67
SMAW	10	焊接态	820	45	50

注：表中的冲击试验数据为－20℃夏比 V 形缺口冲击试验。

③ 022Cr25Ni7Mo3WCuN 双相不锈钢简介。022Cr25Ni7Mo3WCuN（原牌号为 00Cr25Ni7Mo3WCuN）已纳入 GB/T 3280、GB/T 4237、GB/T 20878、GB/T 21832、GB/T 21833 等标准中，20 世纪 70 年代由日本住友金属工业公司和日本不锈钢工业公司开发出牌号为 DP3 的双相不锈钢，该牌号材料包括钢板、焊接钢管、无缝钢管等。该钢种的特点是在高铬、高钼的基础上添加钨、铜等元素用于提高钢的耐缝隙腐蚀性能，适用于热海水、卤水等介质条件，耐应力腐蚀性能也很好，是一个耐中性氯化物局部腐蚀的材料，已纳入 ASTM A789M、A790（牌号为 S31260）和 JIS G3463、JIS G3459，中国在 80 年代初期发展了相当于 DP3 的钢种 00Cr25Ni7Mo3WCuN，成功地用于海水热交换器和热盐卤水轴流泵部件上。

DP3、022Cr25Ni7Mo3WCuN 型钢的化学成分见表 7-13。ASTM A789M、A790 的 S31260 和 JIS G3463 的 SUS329J4LTB、JIS G3459 的 SUS329J4LTP 等牌号的双相不锈钢化学成分见表 7-2。

表 7-13 DP3、022Cr25Ni7Mo3WCuN 型钢的化学成分（质量分数）[1,9,10] %

牌号	C	Si	Mn	P	S	Cr
022Cr25Ni7Mo3WCuN	≤0.03	0.75	1.0	≤0.03	≤0.03	24～26
DP3	≤0.03	0.75	1.0	≤0.03	≤0.03	24～26

牌号	Ni	Mo	W	Cu	N
022Cr25Ni7Mo3WCuN	5.50～7.50	2.50～3.50	0.10～0.50	0.20～0.80	0.10～0.50
DP3	5.5～7.5	2.5～3.5	0.1～0.5	0.2～0.8	0.1～0.3

022Cr25Ni7Mo3WCuN 钢的双相不锈钢适用于热海水、盐卤水等介质条件，耐应力腐蚀性能也很好，是一个耐中性氯化物局部腐蚀的材料，用于海水热交换器和热盐卤水轴流泵等部件上。

④ 022Cr25Ni7Mo4N 双相不锈钢简介。022Cr25Ni7Mo4N（原习惯牌号为 00Cr25Ni7Mo4N，2507 等）已纳入 GB/T 3280、GB/T 4237、GB/T 20878、GB/T 21832、GB/T 21833 等标准中，该钢是瑞典近年开发的超级双相不锈钢，商业牌号为 SAF2507，PREN 值大于 40，主要用于苛刻的介质，尤其是含氯的环境，如海水等，钢中的高铬、高钼和高氮的平衡成分设计，使钢具有很高的耐应力腐蚀、耐孔蚀和缝隙腐蚀的性能，而且在有机酸和一定范围的无机酸中也有很低的腐蚀速率。一些国家已将该钢纳入标准，如美国的 ASTM A789M 和 ASTM A790-05 标准的 S32750，欧洲 EN 10216-7 和 EN 10217-7 标准的 X2CrNiMoN25-7-4，1.4410 牌号，瑞典的 SS2328 等，美国机械工程学会也认可 2507 钢适用于 ASME 标准的锅炉和压力容器以及化工厂和炼油厂的管道标准。

00Cr25Ni7Mo4N 钢主要用于苛刻的介质，尤其是含氯的环境，如海水等。钢中的高铬、高钼和高氮的平衡成分设计，使钢具有很高的耐应力腐蚀、耐孔蚀和缝隙腐蚀的性能，而且在有机酸和一定范围的无机酸中的腐蚀速率很低。美国机械工程学会也认可 2507 钢适用于 ASME 标准的锅炉和压力容器以及化工厂和炼油厂的管道标准。此钢用于含氯化物的苛刻介质，如化工和制造等工业。举例如下。

a. 含胺的碱溶液管线。管内介质为 20%NaOH、6%胺、0.2%NH_3、52%H_2O 和 21% NaCl，温度 120～140℃。过去曾采用 Inconel 600（含 16%Cr 的镍基合金）和 Nickel 200（可锻的纯镍）都由于均匀腐蚀而损坏，而 SAF2507 钢既有良好的耐氯化物性能，又有耐中等浓度碱液腐蚀的能力，从而解决了这一腐蚀问题。

b. 适用于制作海水冷却介质的热交换设备（例如，炼油厂海水热交换器管程为海水，换热管使用 SAF2507 双相不锈钢，使用 3 年后检查，仍无腐蚀问题），海底输送管道用钢管，也可作船用的螺旋推进器等要求高载荷的，又耐海水腐蚀或其他含氯介质腐蚀的部件。

⑤ 03Cr25Ni6Mo3Cu2N 双相不锈钢简介。03Cr25Ni6Mo3Cu2N（0Cr25Ni6Mo3Cu2N，FERRALIUM alloy 255）已纳入 GB/T 20878、GB/T 21832、GB/T 21833 等标准中，该钢是英国 Bonar-Langley Alloy Limited 公司开发的产品，牌号为 FERRALIUM alloy 255（255 合金），美国 UNS 牌号为 S32550，与法国 CLI 公司开发的牌号 UR52N$^+$ 比较接近，它发展于 20 世纪 70 年代，是第二代双相不锈钢的代表钢种之一，至今仍是大量使用的一个牌号，中国在 20 世纪 80 年代发展了这一钢种，研究了成分范围，尤其是关键元素 Cu 的控制，铜加入钢中对于较低 pH 的环境（如酸性油井、污染的海水等），特别在高流速下产生的磨损腐蚀和空泡腐蚀是有利的。

03Cr25Ni6Mo3WCuN（S32550）钢的双相不锈钢应用范围很宽，至今仍是大量使用的一个牌号，钢中加入铜对于较低 pH 的环境（如酸性油井、污染的海水等），特别在高流速下产生的磨损腐蚀和空泡腐蚀是有利的，有优秀的耐局部腐蚀性能，如在海水介质中有很好的耐孔蚀、缝隙腐蚀、空泡和磨损腐蚀及高的疲劳强度，在许多环境中耐均匀腐蚀性能也较好，是一个在多种介质中适用性很强、应用范围很宽的钢种。

⑥ 022Cr25Ni7Mo4WCuN 双相不锈钢简介。022Cr25Ni7Mo4WCuN（原 0Cr25Ni7Mo4WCuN、Zeron 100 等）已纳入 GB/T 3280、GB/T 4237、GB/T 21832、GB/T 21833 等标准中，该钢最早是由英国 Mather&plattLtd 公司开发的，在 20 世纪 80 年代中期即以铸钢的形式出现，商业牌号是 Zeron100，开发 Zeron100 钢的目标是为解决海底油气田苛刻的介质（含有氯化物、CO_2、H_2S 等）用材，代替耐局部腐蚀和均匀腐蚀性能不足的 Zeron（25Cr-6Ni-2Mo）双相不锈钢。Zeron100 钢已纳入美国 ASTM A789M、ASTM A790-05 标准，牌号为 S32760，与欧洲 EN 10216-7、EN

10217-7 标准牌号为 X2CrNiMoCuWN25-7-4，1.4501 钢相当。目前此钢主要是用于高强度和耐氯化物的局部腐蚀及应力腐蚀。

（7）06Cr26Ni4Mo2 双相不锈钢简介

06Cr26Ni4Mo2（原习惯牌号为 0Cr26Ni5Mo2，我国 GB/T 14976—2002《流体输送用不锈钢无缝钢管》也有 0Cr26Ni5Mo2）纳入了我国 GB/T 21833—2008《奥氏体-铁素体双相不锈钢无缝钢管》标准，它相当于美国的 AISI 329、S32900，日本牌号为 SUS329JITP，是第一代的双相不锈钢。它的特点是屈服强度高（约为奥氏体不锈钢的 2 倍），在海水及有机酸中具有良好的抗点蚀及缝隙腐蚀性能，在含氯化物的介质中有较好的抗应力腐蚀破裂性能，在各种有机酸中的耐腐蚀性能优于 0Cr18Ni12Mo2Ti，此钢是一种耐蚀性、加工性等均好的材料，但是，此钢具有 475℃脆性及 σ 相脆性敏感。此钢主要用于代替在含氯化物介质中易产生应力腐蚀断裂的 18-8 型及 18-8Mo 型不锈钢来制造以海水或工业用水作为冷却介质的热交换器设备。

7.1.2 双相不锈钢的焊接性

双相不锈钢具有良好的焊接性[1,2]，选用合适的焊接材料不会发生焊接热裂纹和冷裂纹；焊接接头力学性能令人满意；除了焊接接头具有良好的耐应力腐蚀能力外，其耐点腐蚀性能和耐缝隙腐蚀能力也均优于奥氏体型不锈钢焊接接头，抗晶间腐蚀能力与奥氏体型不锈钢相当而稍有逊色。双相不锈钢在焊接热循环的作用下，焊接热影响区多次受热，使之成为单一铁素体组织，且晶粒粗大，直接影响焊接接头的力学性能和耐腐蚀性能[1,2]，对此，应从焊接工艺方面探讨采取改善措施。

（1）焊缝的成分和组织

奥氏体与铁素体的相比例是决定双相不锈钢性能的至关重要的因素。为了得到相组成比例较为理想的焊缝金属，通常采取增加焊缝金属中奥氏体化合金元素的办法。例如以氮对焊缝金属合金化，或将镍的质量分数提高到 10%左右。这样就可能获得奥氏体体积分数不少于 30%～40%的焊缝金属[2]。

除了通过合金化达到一定相比例之外，还要考虑焊缝组织的晶粒大小和两相的分布情况。尽可能通过焊接工艺（例如小的热输入）来获取比较细小的一次结晶组织，细小均匀的两相混合组织，有利于提高焊缝的力学性能和抗腐蚀性能。焊缝金属受到随后焊道的热影响，其中的二次转变奥氏体含量有所上升。因此，有时可以利用“退火”来改善焊缝性能，例如在薄板焊缝的背面加“退火”来改善正面焊缝的性能。然后把“退火”焊缝打磨掉，但由于此做法费工费时，只有在特殊情况下才被采用。

（2）焊接热影响区的组织转变和各区段金属的性能变化[2]

① 最高温度低于 1000℃的区段。由于双相不锈钢通常以 1000℃左右回火、淬火或者以 850℃左右终轧状态供货，故在经过通常的焊接热循环条件下，不会发生显著的组织变化。如果不是超低碳的钢种，在此温度下受热，可能会有碳化物 $Cr_{23}C_6$ 析出于晶界上，特别是奥氏体、铁素体相界上。形成该碳化物的碳主要来自于奥氏体，而铬则主要由铁素体提供。这是双相钢的成分和晶体结构特点所决定的。若为超低碳钢种，则一般不会析出碳化物。一般不会由于析出 $Cr_{23}C_6$ 而导致晶间腐蚀。双相不锈钢在此温度范围亦可能生成 σ 相和出现 475℃脆性。总体来讲焊接热影响区，在 1000℃以下区段通常没有明显的性能变化，不会成为焊接性考虑的问题。

② 最高温度在 1350℃以上至固相线温度区段。此时双相不锈钢的平衡组织差不多全是铁素体。然而由于焊接加热的快速性和短暂性，铁素体＋奥氏体转变成铁素体的相变并不能完成。实际金属组织中尚存有相当数量的奥氏体，金属就开始了降温。待降温到某平衡温度

以下，金属组织又会发生逆转变，即铁素体转为二次奥氏体。同样由于热循环的短暂性，再加之此时温度已降得较低，该逆转变二次奥氏体的数量也不会很多，因此该区中的铁素体份额占得较多而奥氏体份额较少。而且，此时的两相组织状态已大大不同于原先的排列：原先轧制状态下成条带状的同奥氏体混存的铁素体，向等轴状结晶发展、长大；而原来呈条带状的奥氏体趋于消失，冷却过程中从铁素体中转变出来的二次奥氏体则呈杂乱的竹叶状在铁素体晶间和晶内先后出现。所以说，这个区段的组织劣化不仅表现为相比例失调，一旦形成了粗大的等轴晶，就很难通过热处理或其他措施予以恢复。

同其他材料的焊接热影响区组织劣化相似，劣化的程度与焊接热规范密切相关。热输入量愈高，高温停留时间愈长，铁素体晶粒愈粗，原有奥氏体残留量愈少，二次转变的奥氏体愈粗大，愈呈集团性分布。由于粗大的铁素体晶粒本身，可以提供应力腐蚀裂纹较长的连续扩展单元，而且裂纹穿越晶界时，即使有少许的晶界奥氏体，其阻滞作用的效果也不佳。已有失效分析案例说明，甚至可能出现晶界上完全没有奥氏体的情况，此时应力腐蚀裂纹在钢材中的扩展性质同单向铁素体型不锈钢一样，沿着粗大的铁素体晶界迅速伸展，完全失去了双相不锈钢的优越性。因此，采用低的焊接热输入应当是焊接双相不锈钢的重要原则之一。

显然，热循环峰值温度最高的熔合线附近，是组织劣化最严重，也是性能劣化最严重的地区。随着劣化区宽度的扩大，焊接接头的性能也随之下降，所以尽量减少劣化区段宽度是提高焊接接头性能的关键。

7.1.3　双相不锈钢焊接要点

为了使焊接接头热影响区各项性能指标与其他部位相同，可采取下列措施。

(1) 焊接方法的选择

在选择焊接方法时应遵循如下原则。

① 避免使用过低或过高的焊接热输入。过低的热输入会使奥氏体相析出大量减少，甚至形成纯铁素体组织，工艺和使用性能大幅度降低。因此，电子束焊和等离子弧焊应避免采用。过高的热输入会使焊缝金属和热影响高温区（HTHAZ）晶粒粗大，韧性下降[1]。一旦由于过热导致大晶粒铁素体，就很难保持或恢复双相不锈钢的优良性能。除电渣焊不能采用外，熔化极氩弧焊（GMAW、MIG）、埋弧焊（SAW）在使用上也将受到限制。

② 适宜使用多层焊[1]。多层焊的后续焊缝的热输入对前道焊缝再一次进行焊接热循环，使焊接热影响区的奥氏体相进一步析出，增加奥氏体相数量且能细化铁素体晶粒，减少碳化物和氮化物从晶内和晶界析出。接头的性能得到改善，所以选择焊接方法时，应考虑满足多层焊的要求，多道次和低熔敷率。

③ 避免使用热处理[1]。双相不锈钢焊接接头若需要通过热处理改善性能时，不仅困难而且受限制。固溶处理的温度很高，达 1000～1050℃，这是其困难的一面。双相不锈钢的中温敏化问题在焊接时一般不会出现。若要采用中温消除应力处理时，由于保温时间长（约 2h），使用会受到钢种本身的限制。

④ 经济性。双相不锈钢设备多为单件，小批量生产，在选用焊接方法时，应考虑其经济合理，维修方便。

双相不锈钢常用的方法有焊条电弧焊和钨极氩弧焊两种。焊条电弧焊适用于全方位的焊接，通用性和灵活性较好，是简便易行、大量使用的方法。就双相不锈钢而言，钛型（金红石型）药皮焊条比碱性焊条的焊接性要好，前者有良好的脱渣性，尤其对于管子根部焊道的脱渣有利，但是对焊件的低温力学性能尤其是韧性有要求时，仍需要考虑采用碱性焊条。为

防止产生气孔，焊前焊条需经250～350℃/2h的烘烤，或者是采用超耐潮焊条。钨极氩弧焊通常用于管接头的根部焊道，或用于管道的自动焊接，也常用于薄板或管和管板接头的焊接。此方法能保证焊件有很好的力学性能，尤其是低温韧性。保护气体通常采用纯Ar或Ar+2%N_2作为保护气体，在单面焊双面成形焊接时，不论采用何种接头形式，背面保护气体是必要的，通常采用纯Ar或Ar+5%N_2。

至于埋弧焊，近年也有使用此方法焊接较厚的双相不锈钢，埋弧焊的问题是稀释率较大，采用合适的坡口形式，正确的热输入以及严格控制道间温度，可以对稀释率加以控制。当焊接厚壁件时，最初熔敷的几层焊道金属因稀释率较大，铁素体量增加，加之冷却速度过慢，有可能使焊缝金属和焊接热影响区脆化。与前两种焊接法相比，此法焊接双相不锈钢用得不多。

(2) 焊接顺序[1,2]

接触腐蚀介质的焊缝要最先施焊；对于单道焊缝，则在非接触工作介质面的焊缝上，加焊一层工艺焊缝，对于多层焊时，除了用小的焊接热输入的多层多道焊外，必要时也可增加工艺焊缝来改善工作焊缝的热影响区性能。

(3) 焊接材料

对于含氮的双相不锈钢和超级双相不锈钢的填充材料，通常采用比母材高的镍和母材相同的含氮量，以保证焊缝金属有足够的奥氏体量。目前采用的填充材料一般都是在提高镍的基础上，再加入与母材含量相当的氮，控制焊缝金属的奥氏体量为60%～70%。为防止焊缝表面区域因扩散而损失氮，通常在氩气保护气体中加入2%N_2（GTAW）[1]。瑞典Sandvik厂的焊接材料见表7-14。为防止气孔和焊接氢致裂纹，需要严格控制焊接材料中氢的含量；当要求焊缝金属具有较高的韧性并进行全位置焊接时，应选用碱性焊条（焊条电弧焊时）；当对焊缝金属有特殊耐蚀要求时，还需使用超级双相不锈钢成分碱性焊条（焊条电弧焊时）。

表7-14 双相不锈钢同种钢焊接所采用的填充金属[1,11]

母材	焊接方法	填充金属牌号	典型化学成分(质量分数)/%									焊缝的α/%①
			C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N	
SAF 2304和SAF 2205	TIG/MIG/SAW	22.8.3.1	0.02	0.5	1.6	0.02	0.015	22.5	8	3	0.14	30～40
	SMAW	22.9.3.1R	0.03	1.0	0.8	0.03	0.025	22.5	9	3	0.12	30～40
		22.9.3.1B	0.04	0.5	0.8	0.03	0.025	22	9	3	0.15	30～40
	FCAW	22.9.3.1T	0.03	1.0	1.5	0.03	0.025	22.5	9	3	0.15	30～40
SAF 2507	TIG/(MIG)/SAW	25.10.4.1	0.02	0.3	0.4	0.02	0.020	25	10	4	0.25	30～40
	SMAW	25.10.4.1R	0.03	0.5	0.7	0.03	0.025	25	10	4	0.25	30～40
		25.10.4.1B	0.04	0.4	0.9	0.03	0.025	25.5	9.5	4	0.25	30～40

① 焊缝中铁素体所占的百分比。

注：1. TIG—钨极氩弧焊；MIG—熔化极氩弧焊；SAW—埋弧焊；SMAW—焊条电弧焊；FCAW—药芯焊丝电弧焊。

2. 填充金属牌号后的符号：1焊丝；1R钛型焊条；1B碱性焊条；1T药芯焊丝。

(4) 焊接裂纹敏感性

近年一些学者作出不锈钢的熔合区凝固裂纹敏感性与Cr_{eq}/Ni_{eq}比值为1.5～2.0时，裂纹总长度最小的结论，也就是说当焊缝金属处于两相凝固区时，对凝固裂纹最不敏感[1]。

7.2 Cr18 型双相不锈钢的焊接

7.2.1 焊接性

Cr18 型双相不锈钢的焊接性良好。热裂纹倾向低，脆化倾向小。薄板和冷拉管适宜采用 GTAW（TIG）法焊接，填丝是必要的。中板可用 SMAW 等法焊接，单面焊时，根部焊道建议采用 TIG 法焊接，一般不需要焊前预热和焊后热处理。为防止接头和 HTHAZ 出现单相铁素体组织，焊接时注意控制热输入和道间温度[1]。

7.2.2 Cr18 型双相不锈钢的焊接工艺

（1）焊接方法与焊接材料

焊条电弧焊适用于中、厚钢板的焊接，氩弧焊通常用于薄板的焊接，填充焊丝可采用母材金属，也可选用 H03Cr19Ni12Mo2（H00Cr19Ni12Mo2）和 00Cr20Ni14Mo3 焊丝。应采用小直径焊丝和小热输入进行施焊，其他工艺措施与焊条电弧焊相同。

① 双相不锈钢同种钢焊接。GTAW 和 GMAW 法焊接时，填充焊丝可采用母材金属，也可选用 H03Cr19Ni12Mo2 和 00Cr20Ni14Mo3 焊丝。应采用小直径焊丝和小热输入进行施焊。GTAW 和 GMAW 法焊接时，采用 3RS63 焊丝，焊缝中铁素体所占的比例为 15%～20%，能得到与母材相匹配的力学性能和耐腐蚀性能。采用焊条电弧焊时，3RE60-PW、A022Si、超低碳 A312 焊条都可使用，其焊缝金属同于采用 3RS63 焊丝气保护焊接。以上焊接材料其熔敷金属的化学成分见表 7-15。选用 A312 和 A022Si 牌号的焊条焊接 022Cr19Ni5Mo3Si2N（00Cr18Ni5Mo3Si2）钢时，其焊接接头的力学性能见表 7-16。

② 双相不锈钢同碳钢的异种钢焊接。GTAW 和 GMAW 法焊接时，通常采用 3RE13 或 Sanicro72 焊丝。焊条电弧焊时，往往采用 A302 或 Inconel 182 焊条。

③ 双相不锈钢同奥氏体不锈钢的异种钢焊接。GTAW 和 GMAW 法焊接时，采用 3RS63、Sanicro72 等。焊条电弧焊时，3RE60-PW、SP298、A022Si、超低碳 A312 和镍基合金焊条都可使用。

表 7-15　Cr18 型双相不锈钢用焊接材料[1]

种类	牌号	化学成分(质量分数)/%								
		C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo	其他
焊丝	3RS63	0.025	0.85	1.4	0.015	0.015	18.5	11.5	2.7	
	3RE13	0.025	0.4	1.7	0.015	0.015	24.5	12.5		
	Sanicro72 (Inconel 82)	0.030	0.15	3.0	0.010	0.010	20			Nb:2.5 Fe≤1.0 Ti:0.32
焊条	3RE60-PW	0.030	1.0	1.2			19	9	2.7	
	SP298	0.03	1.0	1.5			19.5	10	2.8	
	A022Si	0.04	0.7～1.1	2.0	0.03	0.03	18.5～20.51	10.5～12.0	2.5～3.0	为专用焊条
	A312(超低碳)	0.04	1.0	2.5	0.025	0.035	24	12.5	2.5	
	仿 Inconel 182	0.03	0.5	7.5	0.015	0.015	20	余		Nb:2.3 Fe≤7.0

表 7-16 022Cr19Ni5Mo3Si2N（00Cr18Ni5Mo3Si2）焊接接头的力学性能[2]

焊条牌号	抗拉强度 R_m/MPa		硬度(HV)					冲击韧度 a_{kU}/(J/cm²)			
			焊缝	熔合区	热影响区		母材	距熔合线距离/mm			
	焊缝	接头			粗晶区	退火区		0	0.5	1.0	1.5
A312	768	856	199	221	239	229	221	—	—	—	—
A022Si	625	637	220	234	249	245	242	110	97	77	105

（2）预热、焊后热处理

无论是薄板，还是中、厚度钢板的焊接，焊前不需要预热，焊后也不需要进行热处理[2]。

（3）焊接要点

为了减少和防止焊缝和热影响区产生单相铁素体组织，以及焊接热影响区的晶粒粗大，应采取下列工艺措施。

① 焊接时尽量选用小的热输入，即在保证焊接质量的前提下采用小的焊接电流和较快的焊接速度[2]。

② 采用窄焊缝多道焊，道间温度小于 100℃，施焊过程中焊条不允许做横向摆动[2]。

③ 与奥氏体型不锈钢焊缝相反，接触腐蚀介质的焊缝要先焊，使最后一道焊缝移至非接触介质一面。其目的是利用后道焊缝对原先焊缝进行一次热处理，使原先焊缝和热影响区的单相铁素体组织部分转为奥氏体组织[2]。

④ 如果要求接触介质的焊缝必须最后施焊，则在此焊缝上需加一道工艺焊缝，但是焊好的工艺焊缝焊后必须除掉，其目的也是给接触介质焊缝进行一次热处理[2]，使晶粒细化，奥氏体与铁素体两相之间比例合理化，接头综合性能满足要求。

7.3 Cr21 型双相不锈钢的焊接

7.3.1 焊接性

Cr21 型双相不锈钢的焊接性良好，可以采用各种焊接方法进行焊接。采用与母材成分相同的焊接填充材料后，焊缝金属的性能与母材相近。采用 SMAW 焊接时，也可使用不含稳定化元素的 18-8 型奥氏体不锈钢焊条[1]。12Cr21Ni5Ti 钢焊后的力学性能见表 7-17。

表 7-17 12Cr21Ni5Ti 钢焊接接头的力学性能

$R_{p0.2}$/MPa	R_m/MPa	A/%	硬度		标准
			HBW	HRC	
—	635	20	—	—	GB/T 3280
350	635	20	—	—	GB/T 4327

7.3.2 焊接方法与焊接要点

焊接 Cr21 型双相不锈钢的焊接方法有焊条电弧焊和钨极氩弧焊。焊条电弧焊可选用 E309 和 E309L 型焊条；氩弧焊可选 H0Cr20Ni14Mo3 焊丝作为填充金属。施焊时，为了防止热影响区晶粒粗大，尽量使用小的热输入，其他工艺措施与焊接 Cr18 型双相不锈钢相同[2]。

刘政军　徐德昆　等编著

不锈钢焊接及质量控制

The Second Edition
第二版

BUXIUGANG HANJIE
JI ZHILIANG KONGZHI

化学工业出版社

用 SMAW、GTAW、GMAW 及 SAW 等焊接方法进行焊接。

② 建议使用的热输入：0.5～2.5kJ/mm。

③ 最高道间温度不得超过 150℃。

④ 焊接材料。推荐使用的焊接材料见表 7-21。采用 GTAW 法焊接时，需要填丝。

表 7-21 SAF2304 钢使用的焊接材料化学成分（质量分数） %

Sandvik 牌号	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N
22.8.31	≤0.02	0.5	1.6	≤0.020	≤0.015	22.5	8	3.0	0.14
22.9.31R	≤0.025	1.0	0.8	≤0.03	≤0.025	22	9	3.0	0.14
22.9.31B	≤0.04	0.09	0.8	≤0.03	≤0.025	22	9	3.0	0.15

7.6 Cr25 型双相不锈钢的焊接

（1）SUS329J1、NTKR-4、Zeron25（铸）、7-MoPlUS、00Cr25Ni5Mo2N 等双相不锈钢的焊接工艺

① 焊接性。上述几种双相不锈钢的化学成分和性能接近，均具有良好的焊接性，产生裂纹倾向较少。焊接同 18-8 型奥氏体不锈钢，焊前不需预热，一般焊后不需热处理，只有在苛刻条件下使用时，焊后需进行固溶退火处理[1]。

② 焊接方法与焊接材料。它既可采用焊条电弧焊，也可采用钨极氩弧焊进行焊接。焊接材料可选用与母材金属成分相同的填充金属材料或镍基焊丝[1]。

a. 焊条的选用。焊条可采用 E310 型焊条和镍基焊条。制作焊条时，最好采用比母材含镍量高 2%左右的焊芯，这样可提高焊缝金属的奥氏体数量，保证焊接接头与母材有相当的综合性能[1]。

b. 焊丝的选用。焊丝可采用本钢种成分，也可采用 310、Inconel 系焊丝，在可能产生应力腐蚀的环境下使用时，最好采用与母材同成分或 Inconel 系焊丝。与碳钢和铁素体不锈钢异种钢焊接时通常采用 309 型焊丝。双相不锈钢焊丝的选择见表 7-22[1]。

表 7-22 双相不锈钢焊丝的选择[12]

母材钢号	焊接方法	国内（钢研总院）	美国（AWS）	瑞典山特维克（Sandvik）	英国曼切特（Metrode）
00Cr25Ni6Mo2N SAF2507	TIG MIG	H00Cr25Ni8MoN	—	25.10.41	—
0Cr25Ni6Mo3CuN UR52N Ferralium 255	TIG MIG	H00Cr25Ni8Mo3N	ER2553	—	—
0Cr25Ni6Mo3CuN ZERON 100	TIG MIG	H00Cr25Ni8Mo3N	—	—	—
	FCAW		—	—	SUPERCORE 2507

（2）022Cr25Ni7Mo3WCuN（00Cr25Ni7Mo3WCuN、DP3、S31260）双相不锈钢的焊接工艺

① 焊接性。022Cr25Ni7Mo3WCuN 钢与其他含氮的 Cr25 型双相不锈钢一样，有较好的

焊接性，热裂纹倾向低，一般不需要焊前预热和焊后热处理，焊接时需注意控制热输入和道间温度。

② 焊接方法。可采用 GTAW 和 SMAW 等方法焊接。

③ 焊接材料。推荐使用的焊接材料见表 7-23，焊接材料中需含有氮。无氮的焊缝在氯化物介质（5%$FeCl_3 \cdot 6H_2O$+0.05% HCl，50℃）中，易发生集中腐蚀，但如果焊缝含氮量超过 0.20%时，对气孔敏感，冲击功值也有所降低，故对焊接材料中的含氮量需进行控制。焊缝含氮量一般控制在 0.13%～0.2%。

表 7-23　022Cr25Ni7Mo3WCuN 钢用焊接材料[1]

名称	化学成分(质量分数)/%										
	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo	W	Cu	N
Ni8 型焊条	≤0.03	0.5	1.5	≤0.03	≤0.03	24.5	8	3	0.5	0.3	<0.2
25-11 型焊条	≤0.03	0.5	1.5	≤0.03	≤0.03	25	11.5	3	0.5	0.3	<0.2

焊接材料中的 Ni8 型焊丝可以作 TIG 法用的焊丝，使用该焊丝可配制 25-11 型焊条。直接生产 00Cr25Ni7Mo3WCuN 钢丝作焊条时，由于钢丝的热塑性差，成材率低，生产有一定的困难。

(3) Ferralium alloy255、UNS S32750、SA790 等双相不锈钢的焊接工艺

① 焊接性。焊接工艺与焊接奥氏体不锈钢相似，但是为了提高焊缝金属的耐腐蚀性，一般采用更高一些的热输入[1]。通常焊后不需热处理，对于焊件厚度大于 13mm 时，建议最好进行 150℃的预热。

该双相不锈钢可以与其他双相不锈钢或异种钢焊接，如与 316、碳钢等进行焊接。

② 焊接方法与焊接材料。可采用 GTAW、SMAW 和 GMAW 等方法焊接，当采用 SMAW 法焊接时，若使用与母材同成分的 FERRALIUM alloy 255 焊条，由于冷却速度快，焊缝金属会有较多数量的针状铁素体，使焊缝塑性低于母材，因此采用含镍量高于母材的焊芯（镍约 7%），以提高焊缝的奥氏体数量，使焊缝金属具有与母材相等的塑性，表 7-24 列出与母材相同成分及含高镍焊条的熔敷金属的力学性能。

表 7-24　不同含镍焊条的熔敷金属的力学性能

材料	状态	σ_b/MPa	δ/%	A_k/J	γ/%
母材	熔敷态				50
	1120℃固溶	780	30	120	
	固溶+510℃时效	880	28	70	
熔敷金属（与母材同成分的焊条）	熔敷态	865	6	19	45
	固溶	780	28	110	
	固溶+时效	935	7	10	80
熔敷金属（含 6.9%Ni 的焊条）	熔敷态	900	10	54	
	固溶	775	29	120	
	固溶+时效	930	26	85	

(4) S32760 (Zeron100) 双相不锈钢的焊接工艺

① 焊接性。S32760 (Zeron100) 焊缝金属的质量要求一般要达到：−20℃低温的 A_k 值为 28J (最小值)，平均值为 40J。硬度值不大于 28HRC，能通过 6%$FeCl_3$、35℃检验，不产生孔蚀，注意需要控制铁素体量为 35%～60%，这样能达到焊接性、成形性以及耐腐蚀性和力学性的综合平衡。

② 焊接方法。S32760 (Zeron100) 可采用 SMAW、GTAW 和 SAW 方法进行焊接。

③ 焊接材料。焊接材料的典型成分 (质量分数) 见表 7-25。

表 7-25 Zeron100 钢使用的焊接材料的典型成分[1]

焊接方法	焊接材料	化学成分(质量分数)/%								
		C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo	N
SMAW	焊条 (钛型和碱性)	0.03	0.56	0.62	0.018	0.004	25.5	9.8	3.9	0.26
GTAW	焊丝	0.012	0.32	0.49	0.015	0.001	25.01	9.56	4.02	0.24
SAW	焊丝	0.014	0.35	0.44	0.012	0.002	25.13	9.57	3.89	0.25

④ 焊接参数。不同方法焊接采用的典型焊接参数见表 7-26。

表 7-26 Zeron100 钢的典型焊接参数[1]

焊接参数	GTAW ϕ2.4mm	SMAW ϕ3.2mm	SAW ϕ3.2mm
电流/A	80	100	330
电压/V	11	23	32
焊接速度/(mm/min)	45	120	450
道次数	1	4	填满

(5) SAF2507 等双相不锈钢的焊接工艺

① 焊接性。由于钢中合金含量较高，过慢冷却又会导致有害相的析出，需注意控制道间温度不得超过 150℃。

② 焊接方法与焊接材料。SAF2507 钢可用 GTAW、GMAW、SMAW 和 SAW 等焊接方法进行焊接，所使用的焊接材料见表 7-27。GTAW 法焊接时，采用纯氩或 Ar+2%N_2 保护。焊丝 25.10.4.1 用于 GTAW 法焊接，25.10.4.1R 和 25.10.4.1B 用于焊条电弧焊，当焊件有较高韧性要求时，多采用 25.10.4.1B 碱性焊条。异种钢焊接时采用的焊接材料见表 7-28[1]。

表 7-27 SAF2507 钢使用的焊接材料 (质量分数)[1] %

Sandvik 牌号	C	Si	Mn	P	S
25.10.4.1(焊丝)	0.02	0.3	0.4	0.02	0.02
25.10.4.1R(钛型焊条)	0.03	0.5	0.7	0.03	0.025
25.10.4.1B(碱性焊条)	0.04	0.4	0.9	0.03	0.025

Sandvik 牌号	Cr	Ni	Mo	N
25.10.4.1(焊丝)	25	10	4	0.25
25.10.4.1R(钛型焊条)	25	10	4	0.25
25.10.4.1B(碱性焊条)	25.5	9.5	4	0.25

表 7-28　SAF2507 钢与异种钢焊接使用的焊接材料[1]

SAF	碳钢	AISI 300 系钢	9041,Sanico28,254SMO 等
2057	25.10.4.1(焊丝)	25.10.4.1(焊丝)	Sanico60
	25.10.4.1R(钛型焊条)	25.10.4.1R(钛型焊条)	Sanico60

注：Sanico60（焊条）—Cr22Mo9Nb3.5Ni 合金；Sanico60（焊丝）—Cr22Mo9Nb3.5Ni 合金。

③ 热输入。建议 0.2～1.5kJ/mm，为避免快速冷却，厚板焊接一般采用上限值，薄板焊接多采用下限值[1]。

④ 热处理。SAF 2507 钢在冷成形后，例如冷弯，一般变形量不超过 20%，不需要进行随后热处理，但是在苛刻的介质条件下或是冷变形量较大时，还是要进行 1050～1120℃加热，随后空冷或水冷处理。

7.7 工程实例

南京炼油厂是我国使用双相不锈钢焊接构件比较早的一个企业。该厂原油中的无机盐（NaCl、$CaCl_2$ 和 $MgCl_2$）和硫化物（H_2S、RSH、RSR 等），在炼制过程中水解和热解作用产生了大量 H_2S 和 HCl 等腐蚀性较强的物质。在该环境中 Cl^- 的含量一般在 100mg/L，最高达 2000～4000mg/L；H_2S 为 32～65mg/L。在常减压装置中，碳钢产生均匀腐蚀，Cr13 型马氏体不锈钢产生孔腐蚀，而 0Cr18Ni9Ti 奥氏体不锈钢发生了应力腐蚀，造成设备在不发生任何形变的情况下突然破裂，生产被迫中断，遭受极大的经济损失。事故的主要原因是 Cl^- 引起应力腐蚀。鉴此，该厂与北京钢铁研究院共同对 022Cr19Ni5Mo3Si2N（00Cr18Ni5Mo3Si2）双相不锈钢进行了研制。

对研制的 022Cr19Ni5Mo3Si2N 钢板、碳钢和 0Cr18Ni9Ti 钢的钢板进行了挂片均匀腐蚀的比较试验，试验结果见表 7-29。从表中可以明显地看出，022Cr19Ni5Mo3Si2N 双相不锈钢均匀腐蚀速度远远低于其他两种材料。决定在已损坏的设备中的 0Cr18Ni9Ti、1Cr13 和碳钢的焊接结构全部更换为双相不锈钢焊接结构，经十余年生产运行没有发现应力腐蚀破裂情况，取得了明显效果。

表 7-29　00Cr18Ni5Mo3Si2、0Cr18Ni9Ti 和碳钢的钢板均匀腐蚀比较

挂片部位	温度/℃	腐蚀速率/(mm/年)		
		00Cr18Ni5Mo3Si2	0Cr18Ni9Ti	碳钢
常压塔顶	120	2.550～2.750	4.140	5.640
常压塔顶空冷器入口	90	0.162～0.479		18.500
常压塔顶空冷器出口	60	0.146～0.215		18.600
常压塔顶回流罐	40	0.050～0.080	3.510	16.760
常压塔顶回流罐	65			10.520
催化吸收解吸塔顶	40	0.030	0.050～0.110	7.000
催化裂化吸收解吸塔底	110	0.010～0.040	0.020～0.050	11.300
催化裂化稳定塔顶	68	0.040～0.060	0.1～0.410	7.000
催化裂化稳定塔底	190	0.070～0.200	0.210～0.270	9.960
延迟焦化分馏塔顶部	200	0.040		14.300

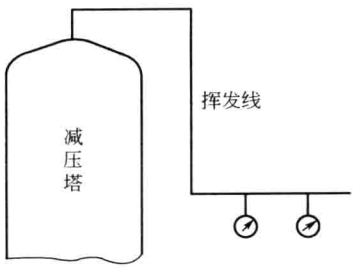


图 7-2 减压塔顶挥发线

(1) 减压塔顶挥发线衬里

减压塔的挥发线水平段因介质为液相，处于管子下半周呈大坑蚀和顺流方向的沟槽状腐蚀，导致管子局部孔蚀穿孔。改用 00Cr18Ni5Mo3Si2 双相不锈钢管（壁厚 2mm，焊条选用 A302），使用 5 年后检查，液相部位衬里表面无腐蚀。减压塔顶挥发线如图 7-2 所示，其规格为 1100mm，采用 00Cr18Ni5Mo13Si2 衬里，从塔顶出口到冷却器全长约 2500mm，用宽板塞焊（焊条 A302），已使用十余年，检查数次，未出现异常现象。

(2) 水冷器

常压塔顶水冷器换热面积为 $180m^2$，用 ϕ25mm×2.5mm×600mm 的碳钢管 197 根，在油气入口处仅工作了 3 个月就腐蚀穿孔。后更换用 00Cr18Ni5Mo3Si2 双相不锈钢管制作的一台水冷却管束的上半部，用 0Cr118Ni9Ti 钢管制作了下半部。使用 3 年后进行对比检查，发现下半台 0Cr18Ni9Ti 管的焊接构件，表面布满腐蚀孔，且孔较深，在管板区域内的管子出现了应力腐蚀裂纹；同台上半部的双相不锈钢管焊接构件，完好无损，没有出现应力腐蚀裂纹。这就显示出双相不锈钢焊接构件，在同等条件下优越于 0Cr18Ni9Ti 的焊接构件。

(3) 空冷器

减压塔顶原为水冷却，后改为空冷器，采用 ϕ25mm×2.5mm×4500mm 管，由 24 片组成，其中用 00Cr18Ni5Mo3Si2 双相不锈管制成 9 片，其余为 0Cr18Ni9Ti 管。对冷凝水介质进行分析为：pH＝7～8.9；Cl^- 16.51～499mg/L，一般小于 150mg/L；H_2S 52.7～175.93mg/L，最高达 1055mg/L。

空冷器运行 8 年后经检查，其中第三级空冷器中 0Cr18Ni9Ti 管束用 0.6MPa 压力做水压试验，发现空冷器上排管几乎都发生泄漏。如在管板内一段管子的孔腐蚀严重发生泄漏，有的连成直径约 5mm 的腐蚀坑，有数条裂纹起源于腐蚀坑，为环形裂纹，长度 9～11mm。管子内外壁均有裂纹发生，有的裂纹已穿透管壁，裂纹有主裂纹和树枝状的细小支裂纹，裂纹有穿晶也有沿晶（即混合型），属于应力腐蚀裂纹的特征。

对裂纹处的腐蚀产物进行能谱分析，其成分的质量分数（%）如下，管外表面 Cl^-：高达 7.809；S：12.657；K：1.429；Ca：3.011；Na：10.859；管内表面 Cl^-：0.149；S：13.08；K：0.786；Ca：0.504。从能谱分析看出，可以认为 0Cr18Ni9Ti 钢管的应力腐蚀破裂是由 Cl^- 而引起的。后全部改用 00Cr18Ni5Mo3Si2 双相不锈钢管，克服了上述缺陷。

SAF2205 双相不锈钢管的焊接管道尺寸：ϕ168mm×13mm 坡口形式与尺寸：60°单 V 形坡口，钝边 2mm，根部间隙 2mm。

焊接工艺：母材与焊接材料的化学成分分别列于表 7-30。采用 TIG 焊打底，焊丝直径 2.0mm。焊缝填充及盖面采用焊条电弧焊，焊条直径 3.2mm。

表 7-30 2205 双相钢管与焊接材料的化学成分（质量分数） %

类别	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N
SAF2205 钢管	0.018	0.38	1.62	0.011	0.006	22.04	5.57	3.01	0.13
TIG 焊丝	0.018	0.49	1.68	0.018	0.003	22.57	8.04	2.99	0.15
焊条	0.025	1.0	0.8	—	—	22.0	9.0	3.0	0.10

焊接参数列于表 7-31，焊接接头的综合性能列于表 7-32。

表 7-31　2205 双相钢管焊接参数

焊接参数	打底焊	第一层	第二层	第三层	盖面
焊接电流/A	190	105	105	105	105
焊接热输入/(kJ/cm)	13	8	12	12	14

表 7-32　2205 双相钢管焊接接头的力学性能

类别	接头横向拉伸强度/MPa	面弯	冲击韧性/(J/cm²)	硬度	晶间腐蚀	点蚀
母材	760,770	合格	0℃ 53,57,63	238～257	合格	无
接头	804,805	合格	—20℃ 48,51,55	面层:220～276 根部:272～284	合格	无

符号说明

JIS（Japanese Industrial Sandard）日本工业标准
DIN（Deutsche Industria Norm）德国工业标准
AISI 美国钢铁学会
ASTM 美国材料与试验协会
SAE 美国汽车工程师协会
ASME 美国机械工程师协会
AWS 美国焊接学会
UNS 美国金属与合金牌号统一数字系统的简称。它是由 ASTM E507 和 SAE J1086 等技术标准推荐使用的。
WRC 美国焊接研究委员会
FN 铁素体序数
CPT 临界孔蚀温度
PRE 孔蚀抗力当量值或孔蚀指数
CTOD 断裂韧性（裂纹尖端张开位移值以毫米记录）
SCC 应力腐蚀破裂
HTHAZ 热影响的高温区
LTHAZ 热影响的低温区
DSS 双相不锈钢
Super DSS 超级双相不锈钢
SAF2507 超级奥氏体-铁素体不锈钢，25%Cr-7%Ni
SAF2205 超级奥氏体-铁素体不锈钢，22%Cr-5%Ni
PWHT 热处理
DBTT 脆性转变温度

参 考 文 献

[1] 吴玖等．双相不锈钢．北京：冶金工业出版社，1999.

[2] 张其枢，堵耀庭．不锈钢焊接．北京：机械工业出版社，2003.
[3] 杜国华主编．实用工程材料焊接手册．北京：机械工业出版社，2004.
[4] [德] 福克哈德．不锈钢焊接冶金．栗卓新，朱学军译．北京：化学工业出版社，2004.
[5] GB/T 1220—2007. 不锈钢棒．
[6] GB/T 3280—2007. 不锈钢冷轧钢板和钢带．
[7] GB/T 4237—2007. 不锈钢热轧钢板和钢带．
[8] GB/T 20878—2007. 不锈钢和耐热钢牌号及化学成分．
[9] GB/T 21832—2008. 奥氏体-铁素体型双相不锈钢焊接钢管．
[10] GB/T 21833—2008. 奥氏体-铁素体型双相不锈钢无缝钢管．
[11] Pattersson C O，Fager S A. Welding Practice for the Sandvik duplex stainless Steels SAF2205 and SAF2507，AB Aandvik Steel，S-811 81 Sandviken，Sweden. 1994.
[12] 吴树雄，尹士科．焊丝选用指南．北京：化学工业出版社，2002.
[13] 五千思主编．钢铁材料手册：第5册．第2版．北京：中国标准出版社，2009.

第8章 沉淀硬化型不锈钢的焊接

沉淀硬化型不锈钢是需经时效强化处理以形成析出硬化相的高强度不锈钢，所以沉淀硬化型不锈钢又称之为析出硬化型不锈钢。这类钢按组织形态可分为马氏体沉淀硬化型、半奥氏体沉淀硬化型和奥氏体沉淀硬化型三类。沉淀硬化型不锈钢列入我国国家标准的牌号有05Cr15Ni5Cu4Nb、05Cr17Ni4Cu4Nb（0Cr17Ni4Cu4Nb）、07Cr17Ni7Al（0Cr17Ni7Al）、07Cr15Ni7Mo2Al（0Cr15Ni7Mo2Al）、04Cr13Ni8Mo2Al、09Cr17Ni5Mo3N、022Cr12Ni9Cu2NbTi、06Cr17Ni7AlTi，其化学成分见表1-1，力学性能见表1-8。

沉淀硬化型不锈钢经热处理或机械处理后可获得超高屈服强度（1000MPa），良好的塑性和耐腐蚀性。这类钢在退火状态下塑性、韧性和焊接性均较好，可以进行冷压成形、冷拉、轧制和旋压成形。

8.1 沉淀硬化型不锈钢简介

8.1.1 半奥氏体沉淀硬化不锈钢

半奥氏体沉淀硬化不锈钢在固溶或退火状态下，组织为奥氏体加5%～20%的铁素体，经一系列热处理或机械变形处理后，奥氏体转变为马氏体，再经时效析出硬化，达到超高强度。

常见的半奥氏体沉淀硬化不锈钢的化学成分、力学性能分别见表8-1～表8-3。

表8-1 半奥氏体沉淀硬化不锈钢的化学成分[1~3] %

钢种	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Al	N
07Cr17Ni7Al（中国）	0.09（0.08）	1.00（0.50）	1.00（0.5）	16.00～18.00（17.0）	6.50～7.75（7.0）	—	0.75～1.5（1.1）	—
07Cr15Ni7Mo2Al（中国）	0.09	1.00	1.00	14.00～16.00	6.50～7.50	2.00～3.00	0.75～1.50	—
17-7PH（美国）	0.09（0.07）	1.00（0.60）	1.00（0.40）	16.00～18.00（17.0）	6.50～7.75（7.0）	—	0.75～1.5（1.2）	—
PH15-7Mo（美国）	0.09（0.07）	1.00（0.60）	1.00（0.40）	14.00～16.00（15.0）	6.50～7.75（7.0）	2.0～3.0（2.2）	0.75～1.5（1.2）	—
PH14-8Mo（美国）	0.02～0.05（0.04）	1.00（0.02）	1.00（0.02）	13.50～15.50（15.1）	7.5～9.5（8.2）	2.0～3.0（2.2）	0.75～1.5（1.2）	—

续表

钢种	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Al	N
AM-350 (美国)	0.10 (0.10)	0.80 (0.80)	0.50 (0.25)	17.0～18.0 (16.5)	3.5～4.5 (4.3)	2.5～3.0 (2.75)	—	(0.10)
AM-355 (美国)	0.10～0.15 (0.13)	0.50～1.25 (0.95)	0.50 (0.25)	15.0～16.0 (15.5)	4.0～5.0 (4.3)	2.5～3.0 (2.75)	—	0.07～0.13 (0.12)
FV520	0.07	2.00	1.00	14.0～18.0	4.0～7.0	1.0～3.0	Ti:0.5,Cu:1.0～3.0	

注：表中的单值为最大值，括号内为名义值。

表 8-2 半奥氏体沉淀硬化不锈钢的典型常温力学性能[1～3]

钢种	处理工艺	形状	$R_{p0.2}$/MPa	R_m/MPa	A/%	硬度 HRC
0Cr17Ni7Al	见表 8-3					
0Cr15Ni7Mo2Al	见表 8-3					
17-7PH	TH-1050	薄板或带材	1276	1379	9	43
17-7PH	RH-950	薄板或带材	1440	1548	6	47
PH15-7Mo	RH-950	薄板或带材	1551	1655	6	48
PH15-7Mo	CH-900	薄板或带材	1793	1827	2	49
PH14-8Mo	SRH-950	薄板或带材	1482	1586	6	48
AM-350	SCT-850	薄板或带材	1207	1420	12	46
AM-355	SCT-850	薄板或带材	1248	1510	13	48
FV520	ATH-1050	薄板或带材	1078	1264	10	41

注：TH-1050＝相变处理＋析出硬化处理（566℃）；RH-950＝冷处理＋析出硬化处理（510℃）；CH-900＝冷加工＋析出处理（482℃）；SRH-950＝固溶＋深冷＋时效硬化（510℃）；SCT-850＝深冷＋回火（454℃）；ATH-1050＝固溶＋相变处理＋析出硬化处理（450℃）。

表 8-3 半奥氏体沉淀析出硬化型不锈钢热处理工艺[4]

硬化类别	热处理		拉伸试验				硬度试验	
	种类	条件	$R_{p0.2}$/MPa	R_m/MPa	A/%	Z/%	HB	HRC
			不小于				不大于	
07Cr17Ni7Al (0Cr17Ni7Al)	固溶	1000～1100℃快冷	380	1030	20	—	229	—
	565℃时效	经固溶处理后，于760℃±15℃空冷保持90min，在1h内冷却到15℃以下，保持30min，再加热到565℃±10℃，保持90min后空冷	960	1140	5	25	363	—
	510℃时效	经固溶处理后，于955℃±15℃空冷保持10min，空冷至室温，在24h以内冷却到－73℃±6℃，保持8h，再加热到510℃±10℃，保持60min后空冷	1030	1230	4	10	388	—

续表

硬化类别	热处理		拉伸试验				硬度试验	
	种类	条件	$R_{p0.2}$ /MPa	R_m /MPa	A /%	Z /%	HB	HRC
			不小于				不大于	
07Cr15Ni7Mo2Al (0Cr15Ni7Mo2Al)	固溶	1000～1100℃快冷					269	
	565℃时效	经固溶处理后，于 760℃ ± 15℃空冷保持 90min，在 1h 内冷却到 15℃以下，保持 30min，再加热到 565℃ ± 10℃，保持 90min 后空冷	1100	1210	7	25	375	
	510℃时效	经固溶处理后，于 955℃ ± 15℃空冷保持 10min，空冷到室温，在 24h 以内冷却到 −73℃ ± 6℃，保持 8h，再加热到 510℃ ± 10℃，保持 60min 后空冷	1210	1320	6	20	388	

常见的美国半奥氏体析出硬化型（沉淀）不锈钢牌号有：17-7PH、PH15-7Mo、PH14-8Mo、AM-350、AM-355。

我国的 07Cr17Ni7Al 与国外型号对应关系见表 8-4，我国的 07Cr15Ni7Mo2Al 与国外型号对应关系见表 8-5。

表 8-4　我国的 07Cr17Ni7Al 与国外型号对应关系[3,4]

标准代号	钢号
GB/T 1220(中国)	07Cr17Ni7Al
JIS G4303(日本)	SUS 631
KS D3706(韩国)	STS61
ASTM/A376(美国) UNS(美国)	631 S17700

表 8-5　我国的 07Cr15Ni7Mo2Al 与国外型号对应关系[4]

标准代号	钢号
GB/T 1200	07Cr15Ni7Mo2Al
ASTM/A376 UNS	631 S17700

8.1.2　奥氏体沉淀硬化不锈钢

该类钢的铬镍含量高，M_s 点在常温以下，固溶后的奥氏体极为稳定。其硬化机理是通过加入一些低温固溶度小的成分，使奥氏体达到过饱和状态，并通过时效析出强化相以达到硬化要求。表 8-6 及表 8-7 为两种美国牌号的奥氏体沉淀硬化型不锈钢的化学成分和力学性能。

表 8-6 析出奥氏体沉淀硬化型不锈钢的典型化学成分（质量分数）[1,2] %

钢种	C	Mn	Si	Cr	Ni
A-286	0.05	1.45	0.50	14.75	25.25
17-10P	0.10	0.60	0.50	17.0	11.0

钢种	P	S	Mo	Al	V	Ti
A-286	0.030	0.020	1.30	0.15	0.30	2.15
17-10P	0.30	≤0.01	—	—	—	—

表 8-7 A-286 钢的低温拉伸力学性能[1,2]（冷变形 53%后时效）

试验温度/℃	$R_{p0.2}$/MPa	R_m/MPa	A/%	Z/%
24	1333	1435	14.0	42.3
−73	1464	1532	14.0	41.3
−129	1510	1590	18.3	41.8
−196	1582	1781	21.0	41.4
−253	1708	1968	23.3	38.9

8.1.3 马氏体沉淀硬化型不锈钢

由于马氏体沉淀硬化和时效硬化均为析出硬化，故此类钢又称为析出硬化型马氏体不锈钢。这类钢含有在马氏体中固溶度小的 Cu、Al、Mo、Ti、Nb 等强化元素，经低温回火后即可达到时效强化的效果。常见马氏体沉淀硬化型不锈钢的化学成分见表 8-8、力学性能见表 8-9、表 8-10。我国的 05Cr17Ni4Cu4Nb 与国外型号对应关系见表 8-11。

表 8-8 典型析出硬化型马氏体不锈钢的化学成分（质量分数）[1~3] %

钢种	C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	Ti	Nb+Ta
17-4PH	0.07	1.00	1.00	15.5～17.5	3.0～4.0	3.0～4.0	—	0.15～0.45
15-5PH	0.07	1.00	1.00	14.0～15.5	3.5～5.5	2.5～4.5	—	0.15～0.45
13-8Mo	0.05	0.10	0.10	12.25～13.25	7.5～8.5	—	Al:0.90～1.35	Mo:2.0～2.5
AM362	0.05	0.50	0.30	14.0～15.0	6.0～7.0	—	0.55～0.90	—
AM363	0.05	0.30	0.15	11.0～12.0	4.0～5.0	—	0.30～0.60	—
Custom455	—	—	—	12	9	2	1	—
05Cr17Ni4Cu4Nb (0Cr17Ni4Cu4Nb)	≤0.07	≤1.00	≤1.00	15.50～17.50	3.00～5.00	3.50～5.00	—	Nb:0.15～0.45

表 8-9 典型析出硬化型马氏体不锈钢的力学性能[1~3]

钢种	处理工艺	形状	$R_{p0.2}$/MPa	R_m/MPa	A/%	硬度(HRC)
17-4PH	H-900	板材或带材	1171	1308	5	40～48
17-4PH	H-1250	板材或带材	998	1067	5	35～43
15-5PH	AH-900	板材或带材	1096	1309	10	388～488HBS
13-8Mo	SRH	板材或带材	1372	1548	11～18	—
AM362	AH-900	薄板	1205	1240	10	—
AM363	AH-900	薄板	812	853	11.5	—

注：表中代号 H—析出硬化处理；AH—相变+析出硬化处理；SRH—固溶+时效硬化处理；数字单位为 F°，其中 900F°=482℃，1250F°=677℃。

表 8-10　05Cr17Ni4Cu4Nb 析出硬化型马氏体不锈钢的力学性能[5]

硬化类别	热处理		拉伸试验				硬度试验	
	种类	条件	$R_{p0.2}$ /MPa	R_m /MPa	A /%	Z /%	HB	HRC
			不小于				不大于	
析出硬化型马氏体不锈钢	固溶	1020～1060℃快冷	—	—	—	—	363	38
	480℃时效	经固溶处理后，470～490℃空冷	1180	1310	10	40	375	40
	550℃时效	经固溶处理后，540～560℃空冷	1000	1070	12	45	331	35
	580℃时效	经固溶处理后，570～590℃空冷	860	1000	13	45	302	31
	620℃时效	经固溶处理后，610～630℃空冷	725	930	16	50	277	28

表 8-11　我国的 05Cr17Ni4Cu4Nb 与国外型号对应关系[4]

GB/T 1220	05Cr17Ni4Cu4Nb(0Cr17Ni4Cu4Nb)
JIS G4303	SUS 630
KS D3706	STS60
ASTM/A376 UNS	630 S17400

8.2 沉淀硬化不锈钢的焊接性

一般情况下，沉淀硬化型不锈钢的焊接性良好。

8.2.1　半奥氏体型沉淀硬化不锈钢的焊接性

这类钢通常在退火状态下进行焊接，由于以奥氏体组织为主，焊接性也与奥氏体型不锈钢相似，焊接性良好，焊接接头不会形成冷、热裂纹。即使这种钢经过相变后转为马氏体组织再进行焊接，对热裂纹也不敏感，这是因为所形成的低碳马氏体的硬度不高，且塑性较好的原因。在近缝区的母材金属也不会出现冷裂纹，因为热影响区在焊接过程中已经奥氏体化，并且焊接接头向室温冷却时残留相当多的奥氏体组织。这类钢的缺口敏感性较强，容易应力集中引起断裂，例如收弧不当可能引起弧坑裂纹。

当采用同质等强度焊接材料施焊出现的问题：一是焊缝和近缝区由于铁素体含量增加而导致脆性增加；二是焊接加热时的高温区由于碳化物溶入奥氏体中，增加了奥氏体的稳定性，降低了近缝区组织的马氏体转变温度，使奥氏体在低温下难以转变为马氏体，出现接头强度低于母材强度的现象[6]。

这类钢对缺口敏感性较强，容易引起断裂。在焊接结构设计中，应尽量避免焊缝应力集中；在施焊过程要避免焊缝咬边，焊缝余高超标，以及焊缝不能圆滑过渡到母材金属而引起应力集中[7]。

8.2.2　马氏体沉淀硬化和时效硬化不锈钢的焊接性

析出硬化型马氏体不锈钢焊接性良好，不论采用同质焊丝还是奥氏体焊丝焊接均不需要焊前预热或后热，焊缝及热影响区也都不会产生裂纹。这是由于所形成的低碳马氏体淬硬性不大，不是拘束度特别大或母材中强化元素偏析严重的特殊情况，不会产生冷裂纹，也不至

于使接头塑性、韧性严重下降。

8.2.3 奥氏体沉淀硬化型不锈钢的焊接性

A-286 钢和大多数沉淀硬化钢、奥氏体不锈钢都具有良好的焊接性，大致相当于半奥氏体沉淀硬化型不锈钢，对裂纹敏感性小，不必采用预热、后热等特殊措施。A-286 钢中含有较高的铝、钛，在焊缝中具有一定的热裂纹倾向，若采用 TIG 焊或控制焊接热输入，可减轻热裂纹倾向。

17-10P 钢的强化元素是碳、磷，所以 17-10P 钢中含磷高达 0.3%。当 17-10P 钢被加热到 1175℃以上时，不可避免在晶界上形成富磷化合物，由此造成缝区具有很大的热裂敏感性与脆性（由磷化物形成的低熔液膜所致），所以熔化焊极为困难。但是适用于闪光焊，因为顶锻时把热脆材料以毛刺形式挤出去，而形成致密的焊缝。

8.3 半奥氏体型沉淀硬化不锈钢的焊接工艺

8.3.1 焊接特点

半奥氏体沉淀硬化不锈钢，塑性和韧性都良好。所以通常在退火状态下进行施焊。焊接特点如下。

① 当焊缝与母材成分相同，要求同材质焊接时，在焊接热循环的作用下，可能出现下列问题。

a. 由于焊缝及近缝区加热温度远高于周围温度，铁素体相比例有所增加，铁素体含量过高将可能引起接头脆化。

b. 在焊接高温区，碳化物特别是铬的碳化物大量溶入奥氏体固溶体，提高了固溶体中有效合金元素含量，进而增加了奥氏体的稳定性，降低了焊缝及近缝区的 M_s 点，使奥氏体在低温下都难以转变为马氏体，造成焊接接头的强度难以与母材相匹配。为此，必须采用适当的焊后热处理，使碳化物析出，降低合金元素的有效含量，促进奥氏体向马氏体转变，通常的措施是焊接结构的整体复合热处理。其中包括以下几个方面。

焊后调整热处理：746℃加热 3h 后空冷，使铬的碳化物从固溶体中析出，提高 M_s 点，促进马氏体转变。

低温退火：930℃加热 1h 后水淬，使 $Cr_{23}C_6$ 等碳化物从固溶体中析出，可大大提高 M_s 点。

冰冷处理：在低温退火的基础上，立即进行冰冷处理（−73℃保持 3h），使奥氏体几乎全部转变为马氏体，然后升温到室温。

② 当不要求同材质等强焊接时，可采用奥氏体型（Cr18Ni9、Cr18Ni12Mo2）焊接材料，焊缝与热影响区均没有明显的裂纹敏感性。

8.3.2 焊接方法

这类钢可采用焊条电弧焊、钨极氩弧焊等焊接方法进行焊接。

8.3.3 焊接材料的选择

① 焊接材料选择与母材金属相同的材料作为填充金属，其目的是使焊接接头性能与母材金属相当。到目前为止尚未研制出一种与母材金属成分相当的焊条，所以如要求焊缝金属成分与母材金属成分相同时，不能采用焊条电弧焊[7]。采用钨极氩弧焊的方法焊接这类钢

时，焊丝可从母材金属上截取，或者熔炼出与母材金属成分相当的棒状焊丝。焊后还需进行下列的整体复合热处理才能使焊接接头力学性能与母材金属等效[7]。

a. 焊后调整处理。在 746℃保温 3h 后空冷，析出铬的碳化物，使固溶的合金元素下降，相变温度点（M_s）上升，为奥氏体转变成马氏体创造条件。

b. 低温退火。在 930℃保温 1h 后水冷，进一步从固溶体中析出 $Cr_{23}C_6$ 等碳化物，使合金元素有效含量大大降低，可使残余奥氏体的相变温度提高 155～166℃。

c. 冰冷处理。在低温退火后立即进行冰冷处理，使其在－73℃保持 3h 以上，然后自然升至室温，使母材金属中的奥氏体全部转变为马氏体组织，在焊缝中仅残留少量的奥氏体，其他全部转为马氏体组织。

d. 时效硬化处理。其处理温度和时间对焊接接头的组织和性能影响较大。当回火时间相同，而回火温度从 350℃增至 600℃时，焊接接头中残余奥氏体减少，回火马氏体增多，组织变得细小而球化，析出碳化物增多。同样在回火温度不变时，回火时间短，则焊接接头中残余奥氏体相增多，马氏体回火不充分，析出碳化物较少，对焊接接头性能不利；反之，回火时间延长，残余奥氏体相减少，马氏体逐渐球化、细小而密布，析出碳化物也增多，对焊接接头强化效果明显提高。

整体复合热处理工艺较为复杂，但是能使焊接接头基本达到与母材金属等强度。

② 选择与母材金属成分不同的异种焊接材料，可用于不要求等强度或等耐蚀性能的焊接接头。焊接方法有焊条电弧焊和钨极氩弧焊。

焊条电弧焊时，可选用 E308、E308L、E309、E310 或 E316 等型号不锈钢焊条。

钨极氩弧焊时，可选用 H0Cr21Ni10、H0Cr19Ni12Mo2、H1Cr24Ni13 或 H1Cr26Ni21 等牌号不锈钢焊丝。

使用上述焊接方法焊接时，焊前不要预热，焊后不需要进行一系列的热处理，就能获得优质的焊接接头。

0Cr17Ni7Al 半奥氏体沉淀硬化不锈钢的自动脉冲 TIG 焊接工艺参数见本章工程实例 1。PH15-7Mo 半奥氏体沉淀硬化不锈钢的自动脉冲 TIG 焊接工艺参数见表 8-12。

表 8-12　PH15-7Mo 半奥氏体沉淀硬化不锈钢的自动脉冲 TIG 焊接工艺参数[1,8]

板厚/mm	接头形式和坡口形式	钨极型号、规格	焊丝牌号、规格	焊接电流/A
1＋1	对接，I 形，无间隙	EWTh-2，ϕ1mm	PH13-8Mo，ϕ1mm	26～30
1.27＋1.27	对接，I 形，b＝2.3mm	EWTh-2，ϕ1.6mm	PH13-8Mo，ϕ0.76mm	65～70

板厚/mm	送丝速度/(cm/min)	保护气体流量/(L/min)		焊枪摆动频率、摆幅
		正面	背面保护	
1＋1	—	He，57	Ar，16.5	—
1.27＋1.27	50.8	Ar，11.3	Ar，19	摆动频率：280 次/min 摆幅：4.3mm

注：1. 以直流正接施焊，焊枪 200A，水冷。

2. 由于结构原因，焊接 1mm＋1mm 板时须通过该间隙施焊，故不得留大间隙。

3. 焊丝以电阻焊预置在接头。

4. 背面加 PH15-Mo 焊丝超低碳可熔性衬垫。

5. 由于须穿过 1.27mm＋1.27mm 板的 2～3mm 间隙施焊，故气体流量必须较大。

8.4 马氏体型沉淀不锈钢的焊接

8.4.1 材料牌号

常见的美国析出硬化型马氏体（沉淀）不锈钢牌号如下：17-4PH、PH15-5Mo、PH13-8Mo、AM-362、AM-363。

8.4.2 焊接材料及焊接参数

焊接材料的选择见表 8-13，焊接方法可选用焊条电弧焊和钨极氩弧焊、电子束焊。17-4PH、15-5PH、FV520 析出硬化不锈钢的焊接材料见表 8-13，17-4PH 电子束焊的工艺参数见表 8-14。

表 8-13 析出硬化不锈钢的焊接材料[6]

钢号	焊接材料牌号	焊接材料成分	焊接方法
17-4PH	E630	Cr16-Ni5-Mo-Cu4-Nb	焊条电弧焊
	ER630	Cr16-Ni5-Mo-Cu4-Nb	气体保护焊
15-5PH	E630	Cr16-Ni5-Mo-Cu4-Nb	焊条电弧焊
	ER630	Cr16-Ni5-Mo-Cu4-Nb	气体保护焊
FV520	FV520-1	Cr14-Ni5-Mo1.5-Cu1.5-Nb0.3	焊条电弧焊
	MET-CORE	FV520Cr14-Ni5-Mo1.5-Cu1.5-Nb0.3	气体保护焊

表 8-14 17-4PH 沉淀硬化不锈钢电子束熔透焊焊接工艺参数[1,8]

接头形式	坡口形式	真空度/Pa	加速电压/kV		焊接电流/mA		工作距离/mm	焊接速度/(cm/min)	焊接时间/s
			定位焊	全焊	定位焊	全焊			
环形对接自嵌衬垫式	I形不留间隙	5.3×10^{-2}	90	110	1	5	152	76	10

注：焊机容量 150kV，25mA，德国斯泰沃尔德固定式电子枪，真空室尺寸 584mm×914mm。

8.5 工程实例

8.5.1 沉淀硬化型不锈钢容器的焊接[7]

（1）产品简介

用厚为 1.5mm 的沉淀硬化不锈钢 0Cr17Ni7Al 钢板作为容器材质，产品尺寸为 ϕ330mm×800mm，采用填充焊丝脉冲钨极自动氩弧焊。焊丝为 0Cr17Ni7Al［化学成分的质量分数（%）：C0.01，Mn0.76，Si0.32，Ni7.75，Cr16.4，Al0.64］。

（2）焊前准备

焊前清理待焊处的油污和脏物，保持其干净，焊丝要清洗，去除表面氧化物。筒体在专用夹具内装配夹紧，夹具应具有焊缝背面惰性气体保护的装置。对接接头装配间隙不大于 0.5mm，每隔 50mm 进行定位焊点固，然后进行正常施焊。

(3) 焊接设备

用 WZE-300 型（原 NZA3-300）自动钨极氩弧焊机，为了克服焊接电流小而不稳，有飘移现象，增加了一个稳定变阻器 AMR-300 来消除此现象。

(4) 焊接参数

焊接参数见表 8-15。

表 8-15　0Cr17Ni7Al 半奥氏体沉淀硬化不锈钢的自动脉冲 TIG 焊接工艺参数

焊丝牌号	焊丝直径/mm	钨极直径/mm	喷嘴直径/mm	钨极与工件表面距离/mm	脉冲电流/A
0Cr17Ni7Al	1.6	4	14	2.5～3.0	120

焊丝牌号	维弧电流/A	脉冲频率/Hz	气体流量/(L/min)		焊接速度/(cm/min)
			正面	背面	
0Cr17Ni7Al	28	5	14	3～4	21.4

注：使用 WZE-300 自动 TIG 焊机，并配 AMR-300 稳定相变阻器。I 形坡口，装配间隙＜0.5mm。送丝速度为焊机刻度 0.4 处。夹具背面气体保护。钨极顶端要磨成锥角 30°，脉宽比 $K=40\%$。

(5) 焊后检查

对焊缝外形尺寸进行检测，焊缝宽度为 4～5mm，焊缝正背面余高为 0.5mm；焊缝外观无焊接缺陷；焊缝内部质量经 100%X 射线检测，无超标缺陷。

容器经调质时效处理后，破坏压力达 10MPa，产品焊接试板的接头抗拉强度相当于母材金属的 98%，冷弯角达 70°～80°，完全满足了设计图样的要求。

8.5.2　离心式二氧化碳压缩机叶轮的焊接[1,2]

(1) 产品简介

叶轮是压缩机的核心部件，其工作条件复杂，高温、高压、高速旋转叶轮对焊接接头的质量提出了严格的要求。

叶轮材质为 FV520B，其化学成分与力学性能要求分别列于表 8-16～表 8-19。

表 8-16　FV520B 钢的化学成分（质量分数）　%

C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Cu	Nb	S	P
0.05	1.0	0.70	13～15	5～6	1～2	1～2	0.15～0.45	0.03	0.035

注：表中的单值为最大值。

表 8-17　FV520B 钢的力学性能

$\sigma_{0.2}$/MPa	σ_b/MPa	δ/%	ψ/%	A_{kV}(−4℃)/J
833～882	980	15	45	32

注：1. 两个拉伸试样。括号中的数值为平均值。

2. 焊后热处理工艺：850℃×2h+560℃×4h。

表 8-18　FV520B 同材质焊条焊缝金属化学成分（质量分数）　%

C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Nb	S	P
0.020	0.5	0.3	12～13	6.0～6.2	1.0～1.2	0.2～0.4	0.007	0.016

注：表中的单值为最大值。

表 8-19 FV520B 同材质焊条焊缝金属力学性能

$\sigma_{0.2}$/MPa	σ_b/MPa	δ/%	ψ/%	A_{kV}/J	
				室温	−4℃
960～970	1000～1020	15～17.7	53.3～53.3	47～50	48

（2）焊接工艺

① 预热：150℃。

② 焊接电流：110～130A（焊条直径为 ϕ3.2mm），焊接电流：140～150A（焊条直径为 ϕ4.0mm）。

（3）产品焊接结果：焊缝经 PT 检测，表面无气孔、裂纹存在。叶轮在高速试验台上运行试验合格后出厂。

符号说明

JIS（Japanese Industrial Sandard）日本工业标准

CNS 中国台湾（地区）标准

ISO（Interational Organization for Standardization）国际标准化组织

KS（Korean Standard）韩国国家标准

DIN（Deutsche Industria Norm）德国工业标准

AISI 美国钢铁学会

ACI 美国合金铸造标准学会

ANSI 美国国家标准

ASTM 美国材料与试验协会

SAE 美国汽车工程师协会

ASME 美国机械工程师协会

AWS 美国焊接学会

UNS 是美国金属与合金牌号统一数字系统的简称。它是由 ASTM E507 和 SAE J1086 等技术标准推荐使用的。

M_s 马氏体开始转变温度

PH 沉淀硬化

参 考 文 献

[1] 中国机械工程学会焊接学会．焊接手册：第 2 卷．第 2 版．北京：机械工业出版社，2001.

[2] 杜国华主编．实用工程材料焊接手册．北京：机械工业出版社，2004.

[3] 曾正明主编．实用工程材料技术手册．北京：机械工业出版社，2001.

[4] 李维钺．中外钢铁牌号速查手册．北京：机械工业出版社，2005.

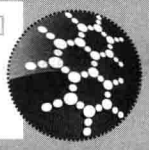
[5] GB/T 1220—2007. 不锈钢棒．

[6] 史耀武主编．焊接技术手册．福州：福建科学技术出版社，2005.

[7] 张其枢，堵耀庭．不锈钢焊接．北京：机械工业出版社，2003.

[8] 美国金属学会．金属手册：第 6 卷．第 8 版．北京：机械工业出版社，1994.

第9章



不锈钢同其他金属材料的焊接

本章介绍不锈钢与黑色金属之间、不同类别或不同牌号的不锈钢之间的焊接方法和焊接材料的选用及焊接特点、焊接参数。常用于异种钢焊接结构的材料见表 9-1。

表 9-1　常用于异种钢焊接结构的材料[1]

组织类型	类别	钢　　号
P	Ⅰ	低碳钢：Q195、Q215、Q235、Q255、08、10、15、20、25、破冰船用低温钢、锅炉和压力容器用钢板 Q245R
	Ⅱ	中碳钢和低合金钢：Q275、15Mn、20 Mn、25 Mn、30Mn2、30、14MnNb、09Mn2、15Mn2、18MnSi、27SiMn、15Cr、20Cr、30Cr、10Mn2、20CrMnTi、20CrV
	Ⅲ	造潜艇用特殊低合金钢：AK25①、AK17①、AK28①、AJI5①
	Ⅳ	高强度中碳钢和低合金钢：35、40、45、50、55、35Mn、45Mn、50MrI、40Cr、45Cr、50Cr、35Mn2、40Mn2、45Mn2、50Mn2、30CrMnTi、40CrMn、35CrMn、40CrV、25CrMnSi、30CrMnSi、35CrMnSiA
	Ⅴ	铬钼热稳定钢：15CrMo、30CrMo、35CrMo、38CrMoAlA、12CrMo、20CrMo
	Ⅵ	铬钼钒、铬钼钨热稳定钢：20Cr3MoWVA、12Cr1MoV、25CrMoV
F、F-M	Ⅶ	高铬不锈钢：06Cr13、12Cr13、10Cr15、10Cr17、022Cr17
	Ⅷ	高铬耐酸耐热钢：10Cr17、10Cr17Mo、16Cr25N
	Ⅸ	高铬热强钢：1Cr11MoVNb、1Cr12WNiMoV①、1Cr11MoV①
A	Ⅹ	奥氏体耐酸钢：022Cr19Ni10、06Cr18Ni10、12Cr18Ni9、17Cr18Ni9、06Cr18Ni11Ti、1Cr18Ni9Ti、07Cr18Ni11Nb、06Cr17Ni12Mo2Ti
A-F	Ⅺ	奥氏体高强度耐酸钢：0Cr18Ni12TiV、Cr18Ni22W2Ti2
	Ⅻ	奥氏体耐热钢：06Cr23Ni13、06Cr25Ni20、16Cr25Ni20Si2、16Cr20Ni14Si2
	ⅩⅢ	奥氏体热强钢：4Cr14Ni14W2Mo、Cr16Ni15Mo3Nb①
	ⅩⅣ	铁素体-奥氏体高强度耐酸钢：12Cr21Ni5Ti

①为原苏联钢号，下同。

注：P 为珠光体；F 为铁素体；M 为马氏体；A 为奥氏体。

9.1 异种金属焊接的特点

9.1.1 异种金属熔焊的主要问题

（1）熔点的差异

两种金属的熔点差很大时，很难获得一个满意的焊接接头。

（2）线胀系数的差异

当一种线胀系数大的金属与另一种线胀系数小的金属焊接成复合结构时，可能导致焊缝或热影响产生裂纹，甚至还会导致焊缝与母材金属剥离[1]。

（3）热导率的差异

当两种金属热导率差异很大时，被焊材料熔化不同步，造成金属结合不良，导致焊缝结晶条件变坏，焊缝性能和成形不良[1]。

（4）电磁性的差异

在异种金属熔焊时，有时会出现焊接电弧偏弧或者电弧燃烧不稳定现象，造成焊缝成形不良，这往往是由于两种金属的电磁性相差很大而造成的[1]。

（5）形成脆性化合物

异种金属焊接时可能会形成某些金属间的脆性化合物，对焊接接头的力学性能影响很大，往往会降低焊缝的塑性和韧性。随着金属间脆性化合物的增多，焊缝在结晶过程中形成的裂纹倾向加大，在使用过程中会使焊接接头发生脆性断裂[1]。

（6）焊接接头难于达到与母材金属等性能

通常，两种不同金属结合在一起会构成腐蚀电偶，因而其耐蚀性要比其中任一金属都低，这是一个不易解决的难题。此外，为了实现异种金属的焊接性，往往选用塑性较好的焊接材料，以避免焊缝金属开裂或脆化，但可能会降低焊接接头的强度[1]。

异种金属焊接时需要解决的问题较多，焊接难度也很大，只有选用合理的焊接方法和焊接材料，制定合理的焊接工艺，才能获得优质的异种金属焊接接头。

9.1.2 异种金属熔焊的焊接性

异种材料焊接的根本问题，是如何确保熔敷金属以及熔合区的质量优良。熔合区的问题往往比熔敷金属的问题更为突出，因为熔合区的成分复杂、组织很不均匀，其性能也更难以得到保障，很可能成为异种钢焊接接头失效的起始部位。

（1）焊缝金属的化学成分

熔焊时，熔池金属是由被熔化的母材金属与熔化的填充金属混合而成的。采用不同的焊接方法，熔合比（母材金属的熔入量占焊缝金属总量的份额比例叫做熔合比）有较大的差异；不同的坡口形式和焊接热参数也能影响熔合比；焊接过程中参数难免不波动，这又会成为影响焊缝成分稳定的因素，因此确保焊接参数稳定的问题，在异种材料焊接中就显得尤为重要。

（2）焊接接头熔合区的化学成分不均匀

被焊的异种材料的成分差异愈大，则熔敷金属与熔合区或母材金属的成分差异也愈大，金属的成分差异构成了腐蚀电池，所以异种金属的焊缝的耐腐蚀寿命，可能比其中任一材料的耐腐蚀寿命都大大缩短[1]。

熔合区成分的不均匀性，与焊接过程中熔池的边缘处母材金属份额较高且未被搅拌均匀有关，因为熔池边缘的温度较其平均温度低，距电弧电流中心较远，电磁搅拌力也较弱，金

属的流动性较差，被熔化的母材金属处于液态的时间较短，在比较严重的情况下，甚至可以看到成块的母材金属以岛屿或半岛状贴近于焊缝边缘[1]。这种成分不均匀性的程度与焊接工艺参数有关，特别是与施焊过程中的均匀性和稳定性关系更大，也与填充材料的化学成分、焊道/层数、焊后热处理等有关[2]。在高度自动化的焊接条件下，焊缝不均匀混合区的不均匀程度可以得到控制，而手工电弧焊时，很难达到施焊过程焊接工艺参数的均匀性和稳定性。

(3) 焊接接头熔合区的组织与性能的不均匀性

熔合区的成分不均匀，必然会导致熔合区的金属组织和性能的不均匀性。其不良影响的严重程度，一方面同成分不均匀性的严重程度有关；另一方面在很大程度上又与母材金属同焊缝金属各组成元素间相互作用的性质有关。

(4) 异种钢焊接接头裂纹

异种钢焊接接头熔合区的裂纹，与该部位的成分不均匀性和组织不均匀性有直接关系。其中存在着导致裂纹的硬脆化合物中间相或产生易淬火硬化的合金，则可能在此萌生裂纹。异种钢焊接时，通常会出现下列形式的裂纹。

① 近缝区裂纹。大多数发生在与具有淬火倾向的高合金马氏体钢或一般低合金的珠光体钢焊接时。近缝区裂纹形态为与熔合线平行并与熔合线略有一点距离处所出现的裂纹。近缝区裂纹也分热裂纹和冷裂纹。

a. 近缝区冷裂纹。形成原因是在近缝区形成硬脆的马氏体组织所致，它的比容增大造成组织应力加大，导致近缝区出现微裂纹，在焊接拉应力作用下，微裂纹扩展为宏观裂纹；或者是在淬火钢焊缝的近缝区，由于氢从焊缝金属中扩散到近缝区并使之饱和，产生较大的内应力，增加了近缝区脆性而发生氢致裂纹。

b. 近缝区热裂纹。在焊接碳钢-奥氏体不锈钢接头时，碳钢坡口部位母材中的低熔点夹杂物被吸入奥氏体不锈钢的近缝区形成液态薄膜，接头内较大的拉应力将其拉断（位于近缝区），出现晶间热裂纹。

② 焊缝金属中的热裂纹。焊缝金属为纯奥氏体组织时，最易出现焊缝中心热裂纹。其形成机理与奥氏体不锈钢焊接形成热裂纹一样，在焊缝尚未完全结晶之前，熔池中存在低熔点液膜（共晶体），在结晶过程中，熔池收缩焊缝受拉应力作用，低熔点液态薄膜（强度很低）在拉应力作用下被破坏，形成结晶裂纹。为了防止形成热裂纹，可以通过选择合适的焊接材料，确保得到合理的焊缝金属化学成分，避免焊缝热裂纹的形成。

③ 焊接接头中的残余应力引起的裂纹。该裂纹是因为异种钢焊接时由于两种母材金属热膨胀系数不同，焊接温度场的上下部分不对称所致[1]。

(5) 获取优质异种材料焊接接头的工艺措施

为了获得优质焊接接头，接头热膨胀系数接近母材金属，应尽量排除焊接接头中熔合线的组织与焊缝金属不一致，希望高合金焊缝一侧没有显著的稀释现象。为此，在工艺上应采取下列措施。

① 正确地选择焊接材料，焊接材料应有良好的性能，而且同两种母材都有良好的兼容性，以形成性能良好的焊接接头，确保接头无裂纹。

② 根据焊接构件特点和焊接接头形式来选择坡口，焊件坡口加工尺寸和装配尺寸的精度要高于同材料焊接的要求。

③ 根据被焊材料的焊接性，制定合理的焊接热参数（热输入和预热、缓冷、焊后热处理等）。还必须同时考虑它对熔合比的影响，以确保焊缝金属的成分和组织。

④ 尽量提高焊工的操作技能，维持焊接参数在施焊过程中的高度稳定性，以保证焊缝金属成分，尤其要尽量控制熔合区成分的不均匀的厚度，而且要连续稳定。在可能的条件下

尽量提高自动化程度。

9.2 奥氏体型不锈钢与珠光体钢的焊接

许多设备是采用奥氏体型不锈钢与珠光体钢焊接而成的。奥氏体型不锈钢用于容器内壁接触腐蚀介质或耐高温的部位，常用的材质有 Cr18Ni9 系列和 Cr23Ni13 系列；珠光体钢则用于要求不十分苛刻的部位，其材质有低碳钢、低合金钢、铬钼热稳定性钢等。使用这种焊接结构能节省大量的不锈钢材料，大大降低设备的成本，所以得到广泛采用。

奥氏体型不锈钢与碳钢在化学成分方面、物理性能（如热导率、线胀系数）方面有很大的差异。为了获得一个满意的焊接接头，必须对两种钢的化学成分、力学性能、物理性能、组织和形成焊接接头可能出现的问题进行分析，从焊接方法、焊接材料和焊接参数等方面确定合理的焊接工艺。

9.2.1 焊接性分析

奥氏体型不锈钢与珠光体钢焊接时，被焊母材金属受到焊接热循环而发生组织转变以及随之可能出现下列问题。因异种钢焊接时焊缝和熔合区的化学成分受到两种母材金属和填充材料的共同制约，所以焊缝和熔合区成分、组织十分复杂，且又受到焊接工艺的强烈影响，焊接质量不易得到保证，所以下面讨论的问题的中心在焊缝和熔合区。

（1）焊缝成分稀释

由于珠光体钢中只含有少量的合金元素，如它熔入焊缝金属的份额增大，则焊缝金属的合金比例降低，从而改变焊缝金属的化学成分和组织状态。这种现象称为母材金属对焊缝金属的稀释作用。如果由于焊缝的过分稀释，可使焊缝中奥氏体形成元素不足，结果在焊缝中出现马氏体组织，使焊接接头的脆性增大，导致焊接接头形成裂纹[1,3]。稀释程度取决于母材金属在焊缝金属中所占的质量比。奥氏体型不锈钢与珠光体钢的焊缝，希望母材在焊缝金属中所占的质量比要小，即稀释度小一些，而且要求熔合比稳定，力求由焊接材料来主控焊缝金属的成分和组织，降低其受熔合比波动的影响程度。其目的是减少焊缝裂纹，保证焊接接头的性能（影响焊缝稀释程度的因素很多，有焊缝形状、焊接电流、电弧电压、焊接速度等。焊接方法不同对焊缝稀释程度影响很大，表 9-2 列出了几种焊接方法的熔合比范围）。下面以 Q235 钢与 12Cr18Ni9 焊接为例，来讨论分析用各种填充材料所焊成的焊缝金属的金相组织以及熔合比变化所带来的影响。首先将钢的各合金元素含量按式(9-1)、式(9-2) 折算成铬当量和镍当量，再借助舍夫勒组织图，即在图 9-1 中找出相应的点，即可知该钢焊缝的正常冷却组织中的相组成。

表 9-2 几种焊接方法的熔合比调节范围[1]

焊接方法	熔合比/%	焊接方法	熔合比/%
焊条电弧焊(碱性焊条)	20～30	埋弧焊	30～60
焊条电弧焊(酸性焊条)	15～25	带极埋弧焊	10～20
熔化极气体保护焊	20～30	非熔化极钨极氩弧焊	10～100

12Cr18Ni9 钢与 Q235 钢没有焊接以前，铬当量和镍当量见表 9-3，分别为图 9-1 中的 a、b 两点。如果不加填充金属进行钨极氩弧焊，假定这两种金属熔入焊道中的比例各为一半，其熔合比分别是 50%，则在图 9-1 中可找到对应的 f 点。从图中可以看出 f 点所处焊缝金属的位置为马氏体组织。马氏体组织是一个又脆又硬的组织，容易使焊缝产生裂纹。

表 9-3　Q235 钢和 12Cr18Ni9 钢的铬、镍当量[1]

钢号	化学成分(质量分数)/%					Cr_{eq} /%	Ni_{eq} /%	图 9-1 中位置
	C	Mn	Si	Cr	Ni			
Q235	0.18	0.44	0.35	—	—	0.53	5.62	*b*
12Cr18Ni9	0.07	1.36	0.66	17.8	8.65	18.79	11.42	*a*

$$Cr_{eq}(\%)=Cr+Mo+1.5Si+0.5Nb \tag{9-1}$$

$$Ni_{eq}(\%)=Ni+30C+0.5Mn \tag{9-2}$$

12Cr18Ni9 不锈钢与 Q235 钢之间的焊接，焊接材料采用 A102、A307、A407 等焊条，其熔敷金属铬当量和镍当量见表 9-4。首先选用不锈钢焊条牌号为 A102（E308-16）作为填充金属，其铬当量、镍当量对应于图 9-1 中的 *c* 点。采用 A102 焊条焊接这两种材料时，假定这两种母材金属熔入焊缝中数量相同，即两种母材混合熔化后铬当量和镍当量仍为原来的 *f* 点，则当母材金属的熔合比发生变化时，焊缝金属中铬当量和镍当量的质量分数将沿 *fc* 线段各点移动而变化。当母材金属熔合比为 40%时，即两种母材在焊缝金属中各占 20%的质量分数时，焊缝的铬当量和镍当量的质量分数相当于 *g* 点；当母材的熔合比为 30%时为 *h* 点，此时焊缝组织为奥氏体＋马氏体，焊接接头仍有形成裂纹的可能。在完全相同的条件下，若改变焊条的熔敷金属成分，用 A307 焊条（即 E309 型）进行施焊，则焊条熔敷金属铬当量和镍当量为图 9-1 中的 *d* 点。如果母材金属的熔合比为 40%，焊缝的铬当量和镍当量相当于图 9-1 中的 *i* 点，此时焊缝金属为纯奥氏体组织，也易产生裂纹；若熔合比为 30%，焊缝的铬当量和镍当量相当于图中的 *j* 点，此时焊缝金属含有体积分数为 2%的铁素体＋奥氏体组织，对抗裂性和耐蚀性都是有利的。若采用 A407 焊条（E310 型）施焊，则焊条熔敷金属铬当量和镍当量为图 9-1 中的 *e* 点，如果母材熔合比仍为 30%～40%（即焊缝位于图 9-1 中 *fe* 线段中 *k*、*f* 两点），焊缝金属为单相奥氏体组织，也易使焊接接头产生裂纹[4]。

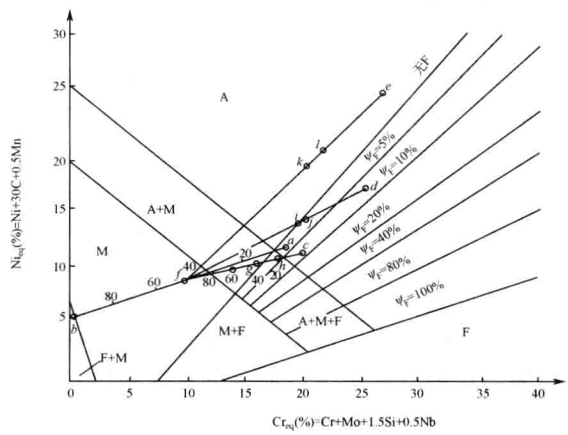


图 9-1　不锈钢舍夫勒组织图

表 9-4　焊条熔敷金属的铬、镍当量[1]

焊条	化学成分(质量分数)/%					Cr_{eq} /%	Ni_{eq} /%	图 9-1 中位置
	C	Mn	Si	Cr	Ni			
A102	0.08	1.22	0.46	19.2	10.0	19.89	12.71	*c*
A307	0.11	1.32	0.46	24.8	12.8	25.52	16.76	*d*
A407	0.18	1.4	0.54	26.2	21.0	27.01	27.1	*e*

综上分析，焊接 12Cr18Ni9 不锈钢与 Q235 钢时，若不加填充金属或用焊条电弧焊采用 A102 焊条施焊时，焊缝金属都不可避免地要出现脆硬的马氏体组织，导致焊缝产生裂纹。用 A307 焊条施焊时，母材金属的熔合比要控制在 30%以下，才能获得较为理想的奥氏体＋铁素体双相组织。用 A307 焊条施焊时，若母材金属熔合比大于或等于 30%或用 A407 焊条

施焊，焊缝金属组织为单相奥氏体组织，焊接接头也有形成热裂纹的倾向。根据以上分析可知，由于珠光体钢的稀释作用，焊缝金属成分和组织会发生很大的变化。但是，通过焊接方法和焊接材料的选择以及对母材金属熔合比的控制，可以在相当宽的范围内调整焊缝金属的成分和组织[4]。

(2) 珠光体钢熔合线附近的焊缝形成脆性过渡层

基体金属对焊缝金属熔池的稀释程度并非是完全均匀的。因熔池边缘液态金属持续的时间最短，温度也较熔池中心部位低，因此熔池边缘液体金属流动性较差，容易结晶形成固态。由于珠光体钢与奥氏体不锈钢焊接材料的化学成分相差悬殊，在珠光体钢一侧的熔池边缘，熔化的母材金属和填充金属不能充分地混合，在此侧的焊缝金属中珠光体钢所占份额增大，且越靠近熔合线稀释程度就越大。而在熔池中心，其稀释程度就小。这样，在珠光体钢与奥氏体型不锈钢焊接时，毗邻珠光体钢一侧熔合线的焊缝金属存在一个成分梯度很大的过渡层，宽度为0.2～0.6mm。在过渡层中存在一个高硬度的马氏体脆性层，有可能使熔合区遭到破坏，降低焊接结构的可靠性。

(3) 熔合区碳的扩散迁移

奥氏体型不锈钢与珠光体钢的焊接接头，在焊后热处理或高温运行服役时，其熔合区附近会发生碳由珠光体钢向奥氏体焊缝的扩散迁移。

碳扩散迁移的结果，熔合区的珠光体组织由于碳的含量降低而转变为铁素体组织，导致软化，且在高温的长时间作用下，铁素体晶粒还会显著地长大，导致接头塑性、高温持久强度等下降；同时增碳层中的碳化物也变得粗大，硬度和脆性明显增加，使耐蚀性能降低。由于高温持久强度和耐蚀性能降低可能使接头在熔合区产生破坏。

(4) 熔合区的热应力

由于奥氏体型不锈钢的线胀系数比珠光体钢大30%～50%，而热导率只有珠光体钢的1/3，所以在局部加热、局部冷却的过程中珠光体钢的冷却收缩量少许多，焊后的拉应力区大为减小。这样有可能使珠光体钢侧熔合区位于压应力区域，而奥氏体钢侧的应力为拉应力。而残余应力的最大应力梯度区（压应力方向转变区）落在熔合线附近。这样，异种钢接头在高温下长时间运行期间，熔合区将产生相当大的附加蠕变。这是线胀系数差异产生最大的不利影响，更突出地表现在运行温度波动（特别是开、停车）时，焊接接头处于热疲劳状态。而此时正是产生交变应力的最危险状态，这种危险状态最有可能落在熔合区（或脱碳层）附近，因而极易造成焊接接头的早期破坏。

根据以上分析可见，以奥氏体不锈钢为填充金属焊接奥氏体-珠光体异种材料时，成分不均匀所导致的脆性过渡层、碳扩散问题以及膨胀系数差异所导致的温差应力和变温疲劳问题均发生在珠光体钢一侧焊缝的熔合区，因而成为矛盾的焦点。大量的失效案例均证明了这一点。

(5) 延迟裂纹

由于氢在高温熔融金属的溶解度比固态金属的溶解度大许多倍，然而焊接时是局部加热，冷却时速度很快，导致氢来不及逸出，使氢在焊接接头中处于过饱和的亚稳定状态。在异种金属焊接时珠光体钢一侧的熔合线区，奥氏体焊缝中的大量过饱和氢不易直接向大气逸出，而是向扩散系数大得多的珠光体钢中扩散，造成珠光体钢中扩散氢的骤集，从而为延迟裂纹创造了条件。因此，异种钢焊接接头珠光体钢的冷裂纹倾向比同种钢焊接时更为严重，特别是（成分）过渡区中有较厚的马氏体脆性层时尤为突出。

9.2.2 焊接工艺

焊接要点：选用熔合比小、稀释率低的焊接方法和工艺参数，如焊条电弧焊、非熔化极

氩弧焊、熔化极氩弧焊等；选用大的坡口角度；选用直径小的焊条、焊丝；选用小的焊接电流、高的电弧电压。

（1）焊接方法的选择

这两类钢焊接时，除了考虑生产效率和具体的焊接条件外，还要考虑熔合比对其质量的影响。通常希望熔合比越小越好，以降低焊缝金属的稀释程度，避免裂纹的产生。

焊接方法可选用非熔化极气体保护焊、熔化极气体保护焊、焊条电弧焊和埋弧焊等方法。表 9-2 列出了上述焊接方法的熔合比调节范围。表 9-2 和图 9-1 告诉我们，采用非熔化极钨极氩弧焊时，如果不采用填充焊丝进行焊接，其熔合比最大；而采用填充焊丝施焊时，熔合比可以调节得小些。焊条电弧焊除了熔合比范围小外，它还具有操作方便、灵活，不受工况条件限制的优点，所以在异种钢焊接时，得到广泛的采用。

（2）焊接接头的形式与坡口的选择

异种金属焊接接头的形式，根据被焊金属的焊接性、焊接结构和工作环境条件，可选用下列形式。

① 用焊接材料直接焊成焊缝。这是常用的焊缝形式，即在选用合适的焊接材料和工艺规范的情况下，直接在被焊异种金属的待焊处进行施焊，来获得一个优质的焊接接头。

② 在珠光体钢一侧先堆焊过渡层焊缝[1,3]。对于钢材较厚的异种金属，为了减轻异种金属间碳的扩散程度，在珠光体钢待焊处先堆焊一层含铌、钛、钒等强碳化物合金元素过渡焊缝，然后将该过渡层与奥氏体型不锈钢焊成异种金属的焊接接头。过渡层焊缝中应有比母材金属更多的强碳化物形成元素，有利于降低淬硬倾向。这样，焊前还可不必预热，或降低预热温度，还可减少产生裂纹的倾向。过渡层焊缝形式如图 9-2 所示，焊接非淬火钢时，过渡层堆焊厚度 δ 为 5～6mm；焊接淬火钢时，厚度 δ 要增加到 9mm。焊接厚度大于 30mm 的刚度大的部件时，推荐采用图 9-2(c) 的过渡层焊缝形式。

③ 加中间过渡件的双焊缝的接头[1,3]。采用一般珠光体类型的低合金耐热钢焊接材料焊接奥氏体型不锈钢与铬钼耐热钢时，焊缝中难免要出现马氏体组织，焊接时易出现裂纹，常温性能也较差。而且此焊接接头在高温工作时寿命很短，有的只服役几千小时就开始破坏。通常在制造厂将焊接性较好的中间过渡件同不锈钢焊成一个整体，在安装工地再进行两种不同成分的珠光体钢焊接，最后形成所需要的焊接接头，如图 9-3 所示。其中间过渡件多半选用含有铌、钒、钛等强碳化物形成元素的珠光体钢。

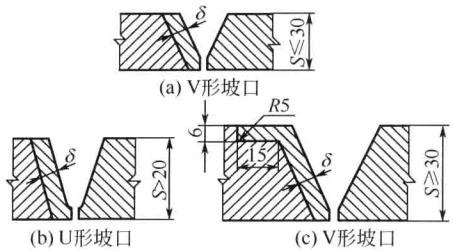


图 9-2　珠光体焊缝上的过渡层焊缝[1,3,4]

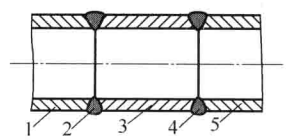


图 9-3　用含铌的珠光体钢作为中间过渡层
1—奥氏体不锈钢；2—奥氏体不锈钢焊缝；3—含钼的铬钼钢；4—铬钼钢焊缝；5—铬钼钢

例如，对用 E309 型不锈钢焊条焊接 2.25Cr1Mo 钢＋12Cr18Ni9 钢的异种钢焊接接头，在 600℃时做持久试验，结果表明，由于碳的强烈扩散，最后拉断位于熔合区。若选用含铌的 2.25Cr1Mo 钢作为中间过渡件，或者在 2.25Cr1Mo 钢一侧待焊处用含铌的 2.25Cr1Mo 焊条堆焊一层过渡层，再用 E309 型焊条进行两工件连接焊缝的施焊，在上述相同的试验条

件下进行试验，碳的扩散程度明显减弱，持久强度得到提高，最后拉断位于铬钼钢一侧。

以焊条电弧焊为例，从图 9-4 中可以看出不同焊接接头形式和焊缝层数对母材金属熔合比的影响是很大的。表 9-5 列出了焊接坡口的角度对母材金属在焊缝中所占比例的估计值。从上述图、表中不难看出，堆焊时母材金属的熔合比最小，随着堆焊层数的增加，熔合比也随之降低；坡口角度愈大，熔合比愈小；焊缝宽度愈大，熔合比也愈小，并随着焊缝层数的增多，熔合比也下降。通常选用 U 形坡口来代替 V 形坡口。多层焊时，根部焊缝的熔合比最大[1]。

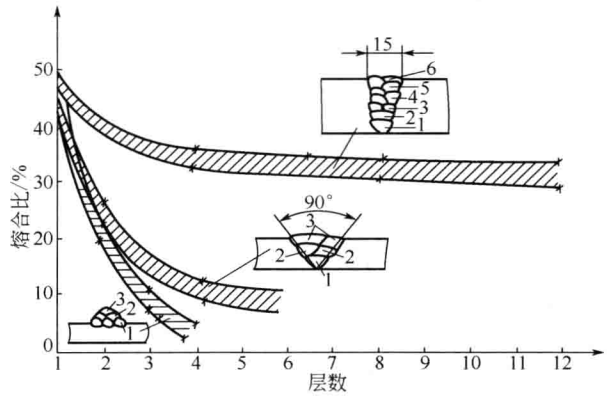


图 9-4 奥氏体不锈钢焊条电弧焊时接头形式对母材熔合比的影响[4]

表 9-5 焊条电弧焊时母材金属在焊缝中所占比例的估计值[1] %

焊 层	焊条电弧焊的坡口角度			堆焊
	15°	60°	90°	
1	48～50	43～45	40～43	30～35
2	40～43	35～40	25～30	15～20
3	36～39	25～30	15～20	8～12
4	35～37	20～35	12～15	4～6
5	33～36	17～22	8～12	2～3
6	32～36	15～20	6～10	＜2
7～10	30～35	—	—	—

（3）焊接材料的选择

奥氏体型不锈钢与珠光体耐热钢焊接时，焊缝及熔合区组织和性能主要取决于焊接材料[1,3]。以焊条电弧焊焊接珠光体钢 Q235＋奥氏体不锈钢 12Cr18Ni9 为例，对焊接材料的选择要考虑下列因素。

① 克服珠光体钢对焊缝的稀释作用。为确保焊缝金属成分和组织良好，分别试用 A132（E347-16）、A302（E309-16）、A307（E309-15）等牌号的焊条进行焊接，从分析中得知焊缝金属成分和组织差别很大。用 A132 焊条（18-8 型）施焊时，焊缝金属基本上是奥氏体加马氏体组织，且越靠近 Q235 钢一侧，马氏体数量愈多，形成脆性破坏的起始区域愈大，因而不适用 A132 焊条。用 $w_{Ni}>12\%$ 的 A302（25%Cr-13%Ni，钛钙型）或 A307（25%Cr-13Ni%，低氢碱型）焊条施焊时，得到的焊缝金属组织是奥氏体加铁素体组织。这是由于镍的含量较高，起到稳定奥氏体组织的作用，是较为理想的焊接材料。

部分奥氏体型不锈钢焊条熔敷金属的铁素体形成元素和奥氏体形成元素的当量见表 9-6。

表 9-6　部分奥氏体型不锈钢焊条熔敷金属的 [A]①、[F]② 当量（质量分数）[1,5]　　%

焊条型号	C	Ni	Mn	[A]	Cr	Si	Nb	Mo	V	[F]
E308L	≤0.04	9.0～12.0	0.5～2.5	8～11.45	18.0～21.0	≤1.00		0.75		18～22.5
E308	≤0.08	9.0～11.0	0.5～2.5	8～11.45	18.0～21.0	≤1.20		0.75		18～22.8
E347	≤0.08	9.0～11.0	0.5～2.5	8～14.65	18.0～21.0	≤1.00	Nb+Ta：8C～1.00	0.75		18～22.0
E316	≤0.08	11.0～14.0	0.5～2.5	10～16.65	17.0～20.0	≤1.00		2.0～3.0		19～24.5
E316L	0.04～0.08	11.0～14.0	0.5～2.5	11～14.45	17.0～20.0	≤1.00		2.0～3.0		19～24.5
E318	≤0.08	11.0～14.0	0.5～2.5	10～16.65	17.0～20.0	≤1.00	Nb+Ta：6C～1.00③	0.75		20～25.1
E317MoCu	≤0.08	12.0～14.0	0.5～2.5	11～17.45	18.0～21.0	≤0.90		2.0～2.5		20～25.5
E317LMoCu	≤0.04	12.0～14.0	0.5～2.5	11～14.45	18.0～21.0	≤0.90		2.0～2.5		20～25.5
E318V	≤0.08	11.0～14.0	0.5～2.5	10～16.65	17.0～20.0	≤1.00		2.0～2.5		19.3～26.2
E317	≤0.08	12.0～14.0	0.5～2.5	11～17.45	18.0～21.0	≤1.00				21～26.5
E309	≤0.15	12.0～14.0	0.5～2.5	11～18.85	22.5～25.0	≤1.00		0.75		22～27.5
E309Mo	≤0.12	12.0～14.0	0.5～2.5	11～18.85	22.5～25.0	≤1.00		2.0～3.0		24～30.5
E310	0.08～0.20	20.0～22.5	1.0～2.5	18～30	25.0～28.0	≤0.75		0.75		24～29
E310Mo	≤0.12	20.0～22.0	1.0～2.5	18～31	25.0～28.0	≤0.75		0.75		24～29

① 奥氏体形成元素当量 $[A]=w_{Ni}+30w_C-0.5w_{Mn}$。

② 铁素体形成元素当量 $[F]=w_{Cr}+1.5w_{Si}+0.5w_{Nb}+V+3.5w_{Ti}$。

③ 铌的质量分数应大于或等于 8 倍的碳质量分数，但不得超过 1.00%或 1.2%。

② 抑制熔合区中碳的扩散。提高焊接材料的含镍量，是抑制熔合区中碳扩散最有效的手段[1,3,4]。随着焊接接头工作温度的提高，要阻止焊接接头中碳的扩散，镍的含量必须提高。通常根据异种钢焊接接头的工作温度，可有 4 个含镍量等级的焊缝。在 350℃以下温度服役，焊缝金属中 w_{Ni} 为 10%；在 350～450℃温度时，w_{Ni} 为 19%；在 450～550℃温度时，w_{Ni} 为 31%；而在 550℃温度以上长期工作时，则要求焊缝金属中 w_{Ni} 为 47%[4]。

③ 改变焊接接头的应力分布。在高温下工作的异种钢焊接接头中，如果焊缝金属的线胀系数与奥氏体型不锈钢接近，那么温度应力（热应力）就集中在珠光体钢一侧熔合区内；如果焊缝金属的线胀系数与珠光体钢相接近，那么温度应力将集中在奥氏体型不锈钢一侧熔合区内。由于珠光体钢通过塑性变形来吸收应力的能力较差，所以高温应力集中在奥氏体型不锈钢一侧比较有利。国外常用与珠光体钢线胀系数相接近的 Cr15Ni70（铬 15 镍 70）镍基材料，作为焊接材料来焊接珠光体钢＋奥氏体型不锈钢[1,3]。

④ 提高焊缝金属抗裂纹能力。珠光体钢与奥氏体型不锈钢焊接时，为了避免在焊缝中出现热裂纹，在不影响使用性能的前提下，最好使焊缝金属中含有体积分数为 3%～7%的铁素体组织，以阻止热裂纹的产生[3]。

对于重要的奥氏体型不锈钢与珠光体耐热钢焊接结构，广泛采用镍基合金型焊接材料。常用的镍基合金型焊接材料是因科镍类焊条和焊丝，其化学成分见表 9-7。

（4）焊接参数的选择与操作要领

奥氏体型不锈钢与珠光体耐热钢焊接时所选用的焊条、预热温度、焊后热处理选用等见表 9-8。

表 9-7 奥氏体型不锈钢与珠光体耐热钢焊接所采用的镍基合金型焊接材料[1]

焊接材料		化学成分(质量分数)/%												
		Ni	Cr	Fe	Cb+Ta	Mn	Co	Mo	Ti	Si	C	Cu	S	P
焊条	因科 A	≥62.0	13.0～17.0	≤12.0	0.5～3.0	1.0～3.0	≤0.12	0.5～2.5		≤0.75	≤0.1	≤0.5	≤0.02	≤0.03
	因科 B	与因科 A 类同												
焊丝	因科镍 82	≥67.0	18.0～22.0	≤3.0	2.0～3.0	2.5～3.5	≤0.2		≤0.75	≤0.5	≤0.1	≤0.5	≤0.015	≤0.03
	因科镍 92	≥67.0	14.0～17.0	≤8.0		2.0～2.7			2.5～3.5	≤0.5	≤0.08	≤0.5	≤0.015	≤0.03
	因科镍 132	≥62.0	13.0～17.0	≤11.0	1.5～4.0	≤3.5				≤0.75	≤0.08	≤0.5	≤0.020	≤0.03
	因科镍 182	≥59.0	13.0～17.0	≤10.0	1.0～2.5	5.0～9.0	≤0.12			≤0.1	≤0.1	≤0.5	≤0.015	≤0.03

注：1. 因科 A 焊条需用直流电源进行施焊，而因科 B 采用交流电源施焊。在电弧偏吹难以克服时，应尽量采用因科 B。

2. 焊丝主要供钨极氩弧焊、埋弧焊和等离子弧焊接时使用。

表 9-8 焊接奥氏体型不锈钢与珠光体耐热钢的焊条、预热及焊后热处理温度的选择[1]

钢材组合	焊条型号	焊前预热/℃	焊后热处理/℃	备注
Ⅹ+Ⅰ	E310	不预热	不回火	不耐结晶腐蚀，工作温度不超过 350℃
	E16-25MoN			不耐结晶腐蚀，工作温度不超过 450℃
	E316			用来覆盖 E16-25MoN 焊缝，可耐晶间腐蚀
Ⅺ+Ⅰ	E16-25MoN			不耐结晶腐蚀，工作温度不超过 350℃
	E318			用来覆盖 E16-25MoN 焊缝，可耐晶间腐蚀
Ⅻ+Ⅰ	E16-25MoN			不得在含硫气体中工作，工作温度不超过 450℃
	Ni307			用来覆盖 E16-25MoN 焊缝，可耐晶间腐蚀
ⅩⅣ+Ⅰ	E16-25MoN			不耐结晶腐蚀，工作温度不超过 350℃
Ⅹ+Ⅱ	E310			不耐结晶腐蚀，工作温度不超过 350℃
	E16-25MoN			不耐结晶腐蚀，工作温度不超过 450℃
Ⅳ+Ⅱ	E316			用 E310、E16-25MoN 覆盖的焊缝表面可以在腐蚀介质中工作
Ⅻ+Ⅱ	E16-25MoN			工作温度不超过 450℃
	Ni307			在淬火珠光体坡口上堆焊过渡层
ⅩⅣ+Ⅱ	E16-25MoN			不耐结晶腐蚀，工作温度不超过 350℃
Ⅹ+Ⅲ	E16-25MoN	不预热	不回火	不耐结晶腐蚀，工作温度不超过 500℃
Ⅺ+Ⅲ	E316			用来覆盖 E16-25MoN 焊缝，可耐晶间腐蚀
Ⅷ+Ⅲ	E16-25MoN			不耐结晶腐蚀，工作温度不超过 500℃
ⅩⅣ+Ⅲ	E16-25MoN			不耐结晶腐蚀，工作温度不超过 300℃
Ⅹ+Ⅳ	E16-25MoN	200～300		不耐结晶腐蚀，工作温度不超过 450℃
Ⅷ+Ⅳ	Ni307	200～300		在淬火钢坡口上堆焊过渡层

续表

钢材组合	焊条型号	焊前预热/℃	焊后热处理/℃	备注
Ⅻ＋Ⅳ	E16-25MoN			不耐结晶腐蚀，工作温度不超过 450℃
	Ni307		不回火或 200～300	在淬火钢坡口上堆焊过渡层
Ⅹ＋Ⅴ Ⅺ＋Ⅴ	E309	不预热或 200～300	不回火	工作温度不超过 400℃，w_C＜0.3%者，焊前不预热
	E16-25MoN			工作温度不超过 450℃，w_C＜0.3%者，焊前不预热
	Ni307			在珠光体淬火钢坡口上堆焊过渡层，工作温度不超过 500℃
	E318	不预热		如要求 E16-25MoN 和 E309 的焊缝耐腐蚀，用 E318 焊条盖面，焊一条盖面焊缝
Ⅷ＋Ⅴ	E309	不预热或 200～300	不回火	不耐结晶腐蚀，工作温度不超过 450℃
	E16-25MoN			不耐结晶腐蚀，工作温度不超过 500℃
	E316			工作温度不超过 500℃，在珠光体钢坡口上堆焊过渡层
Ⅻ＋Ⅴ	E16-25MoN	不预热或 200～300		不耐结晶腐蚀，工作温度不超过 350℃
Ⅹ＋Ⅵ Ⅺ＋Ⅵ	E309	不预热或 200～300		工作温度不超过 520℃，w_C＜0.3%者，焊前不预热
	E16-25MoN			工作温度不超过 250℃，w_C＜0.3%者，焊前不预热
	Ni307			工作温度不超过 570℃，在珠光体钢坡口上堆焊过渡层
	E318	不预热		用 E309、E16-25MoN 焊缝上堆焊盖面层，可耐晶间腐蚀
Ⅷ＋Ⅵ	E309	不预热或 200～300		不耐结晶腐蚀，工作温度不超过 550℃，w_C＜0.3%可不预热
	E16-25MoN			工作温度不超过 550℃
	Ni307			工作温度不超过 570℃，在珠光体钢坡口上堆焊过渡层
Ⅻ＋Ⅵ	E16-25MoN	不预热或 200～300		不耐结晶腐蚀，工作温度不超过 300℃

注：Ni307 是我国镍铬耐热耐蚀合金焊条，w_{Ni}≈70%，w_{Cr}≈15%。钢材组合参见表 9-1。

奥氏体型不锈钢与珠光体耐热钢焊接时，焊接参数选择的原则为降低母材金属在焊缝金属的熔合比，希望熔合比小，且稳定不变。首先，焊条或焊丝直径应尽量选用小一点；选用低的焊接热输入。在保证焊接质量的前提下，尽量选用小的焊接电流、高电弧电压、快速焊接[1,3]。焊接电流与焊条直径的对应关系见表 9-9。

表 9-9　焊接电流与焊条直径的对应关系[1,3]

焊条直径/mm	2.5	3.2	4.0	5.0
焊接电流/A	60	80	105	150

焊接操作要领：不允许焊条（或焊丝）做横向摆动，希望进行多层多道焊，以减少热源在坡口边缘的停留时间，减少碳的迁移和减少母材金属在焊缝金属中的熔合比，提高焊接接头耐热性[1]。

（5）珠光体钢合金元素含量的影响

珠光体类的低合金钢含有锰、钼、钛、钒、铌、铝等合金成分，要按照钢材强度等级选择焊接材料。由于锰、钼、钛、钒、铌、铝等合金成分大多属于稳定碳化物形成元素，当强度等级不太高的低合金钢与奥氏体型不锈钢焊接时，碳主要被结合在稳定碳化物之中，固溶

碳较少，在焊接接头上产生马氏体组织的可能性较小，因而对异种钢的焊接是有利的。此种接头同低碳钢-奥氏体不锈钢焊接接头相比，高温下发生碳迁移的速度和程度都要较微弱些。但是，对于强度等级较高的低合金钢来说，在异种钢的焊缝及热影响区易出现淬硬组织和产生裂纹的倾向。为了防止这些缺陷的产生，在低合金钢一侧待焊处，焊前需要预热，预热温度为 200～300℃，焊后根据焊接构件的刚度大小决定是否需要退火消除焊接残余应力。

9.2.3 工程实例

0Cr18Ni10Ti 与 Q345（16Mn 钢）锻厚板的焊接[1,6]实例如下。

沥青溶液换热器中有一道换热器法兰材质为 Q345（16Mn）钢锻件，与壁厚为 26mm 的 0Cr18Ni10Ti 钢筒体焊接的工序，为异种金属的焊接。

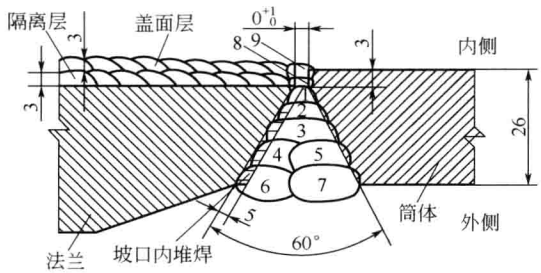


图 9-5 Q345（16Mn）钢锻件与 0Cr18Ni10Ti 钢焊接接头形式、焊接层数与坡口尺寸

（1）焊接方案的制定

在锻件内侧与待焊坡口处堆焊隔离层，然后与筒节成为同质材料的焊接，焊接接头形式与坡口尺寸如图 9-5 所示。

（2）焊接方法的选择

锻件内侧用焊条电弧焊施焊；锻件与筒体焊接采用埋弧焊加焊条电弧焊。

（3）内侧隔离层堆焊

法兰盘内侧堆焊隔离层并延伸至坡口内侧。堆焊前用丙酮仔细清理坡口内侧的油污等杂物，并用氧乙炔火焰进行烘烤，以防止堆焊时产生裂纹和气孔。

堆焊时采用小的焊接电流、多层多道焊，焊条选择及焊接参数见表 9-10。

表 9-10 Q345（16Mn）钢锻件与 0Cr18Ni10Ti 筒体堆焊和焊接参数

焊接层数	焊接方法	焊材牌号及规格/mm	电源极性	焊接电流/A	电弧电压/V	焊接速度/(m/h)
坡口内侧堆焊及第 8 层	焊条电弧焊	A302，ϕ4.0	直流反极	130～150	24～30	0.52～0.61
焊接 1～7 层及第 9 层	埋弧焊	H0Cr18Ni10Ti，ϕ5.0 HJ260	直流正极	450～480	34～36	35～36

注：GB/T 17854—1999《埋弧焊用不锈钢焊丝和焊剂》标准中无 H0Cr18Ni10Ti 焊丝，按 GB/T 4241—2006《焊接用不锈钢盘条》标准采用 H08Cr20Ni10Nb 焊丝更合理。

堆焊时，每道焊缝结束后要及时清除熔渣，以防产生夹渣等缺陷。焊接时分区域进行对称焊，每道相邻焊缝要重叠 1/2。每道焊缝冷却至 100℃以下，再焊下一道焊缝，以减少焊接接头在高温停留时间，来提高焊接接头抗腐蚀性能。

每层堆焊后要进行 100%渗透无损检测，在焊缝外表面没有缺陷的情况下，再堆焊下一层焊缝，堆焊层厚度为 7mm。

堆焊隔离层后进行机械加工，使坡口面光洁，便于埋弧焊。

（4）熔合比

焊接要严格控制焊接热输入，采用小的焊接电流和快速焊接，将熔合比控制在最小值。

装配时，坡口根部不留间隙，最大装配间隙不能超过 1.0mm。正面第一层焊缝用埋弧焊完成，为了防止焊穿，要在焊缝背面铺设焊剂层。各层焊接参数及焊材选用见表 9-10。

正面焊缝全部焊接完毕，背面用碳弧气刨清根，彻底打磨掉渗碳层后，进行背面第 8 层焊缝焊接，采用焊条电弧焊施焊。其焊接参数与内侧隔离层堆焊相同。盖面焊第 9 层仍采用埋弧焊，其焊接参数同正面焊缝。焊后外观检查同内侧隔离层堆焊。

焊接接头内部质量经 X 射线检测不低于 JB 4730—94 Ⅱ 级质量要求。

注：① 0Cr18Ni10Ti 钢最新标准的牌号为 06Cr18Ni11Ti。

② JB 4730—94《压力容器无损检测》已被 JB/T 4730—2005《承压设备无损检测》代替，将来很可能被 NB/T 4713 标准代替。

9.3 奥氏体型不锈钢与铁素体型不锈钢的焊接

奥氏体型不锈钢与铁素体型不锈钢的焊接结构多数都应用于腐蚀、高温环境之中。因为这种焊接结构在空气或酸、碱、盐的水溶液中，具有很高的化学稳定性，比较耐氧化和耐腐蚀。

9.3.1 焊接性

奥氏体型不锈钢与铁素体型不锈钢焊接，主要问题发生在铁素体型不锈钢一侧，焊缝易产生裂纹，且焊接高温区易产生粗晶和脆化现象[1]。

9.3.2 预热温度及回火温度

预热温度及回火温度的选择见表 9-11。

表 9-11　奥氏体不锈钢与铁素体型、马氏体型不锈钢焊接时的焊条及其预热、回火温度[1]

钢材组合	焊条型号	预热温度/℃	回火温度/℃	备注
Ⅶ＋Ⅹ	E309	150～200或不预热	720～760	不耐结晶腐蚀，在无硫介质中工作温度可达 650℃
Ⅶ＋Ⅺ	E316	150～200或不预热	720～760或不回火	在浸蚀性气体介质中工作温度≤350℃
	E318			不耐结晶腐蚀，在无硫介质中工作温度可达 650℃
	E16-25MoN			工作温度可达 540℃
	E347			未经热处理的焊缝不耐结晶腐蚀，工作温度可达 570℃
Ⅶ＋Ⅷ	A122	200～250	750～800	回火快速冷却可耐晶间腐蚀
Ⅷ＋Ⅹ	A122	不预热	720～750	回火快速冷却可耐晶间腐蚀
Ⅷ＋Ⅺ	E316	不预热	不回火	回火快速冷却可耐晶间腐蚀
	E318			回火快速冷却可耐晶间腐蚀
	E309			在无硫气氛中工作温度可达 1000℃
Ⅷ＋Ⅺ	E16-25MoN	不预热	不回火	可在较高的温度下工作
	E347		720～800或不回火	焊后状态耐晶间腐蚀
Ⅷ＋Ⅷ	A122		720～760	焊缝耐晶间腐蚀

续表

钢材组合	焊条型号	预热温度/℃	回火温度/℃	备注
Ⅸ＋Ⅹ	E309	150～200	750～800	不耐结晶腐蚀，工作温度可达 580℃
Ⅸ＋Ⅺ	E316		不回火	焊后状态耐晶间腐蚀
	E318		720～760	
	E309		720～760	工作温度可达 650℃
	E16-25MoN			工作温度可达 580℃
	E347		750～800	焊后状态耐晶间腐蚀
Ⅸ＋Ⅻ	A122	200～250		回火快速冷却可耐晶间腐蚀

注：1. 钢材组合见表 9-1。

2. A122 为我国双相不锈钢焊条牌号，钛钙型药皮，其焊缝金属主要成分（质量分数）如下：C≤0.08%；Cr 20.0%～24.0%；Ni 7.0%～10.0%；Si≤1.5%。

9.3.3 焊接材料

可以选用镍基焊接材料，但成本较昂贵。

用钨极氩弧焊焊接上述异种钢时可选用奥氏体不锈钢焊丝，如 H08Cr20Ni10Nb、H08Cr19Ni12Mo2 和 H12Cr24Ni13 等；也可选用与铁素体型母材金属成分相似的填充材料[1]。

9.3.4 焊接工艺

应采用尽量小的焊接电流，尽快的焊接速度，焊道要窄，焊条不做横向摆动；多层焊时，要严格控制道间温度，待前一焊道冷却后，再焊下一道焊缝[1]。

焊条电弧焊时，引弧要在引弧板上进行，不得在母材上随便引弧；焊接时焊条角度要正确，运条要平稳；电弧不宜过长；收弧时采用回焊收弧法填满弧坑，避免产生弧坑裂纹。

用钨极氩弧焊焊接时，引弧时要提前 5～10s 送氩气；在引弧板上引燃电弧后，立即将电弧引入待焊区。采用熔化极气体保护焊（MIG）焊接时，一般焊接薄板采用短路过渡，中厚板焊接时可采用射流过渡。在焊接过程中要随时观察焊缝的颜色；银白色、金黄色为最好，蓝色良好，红灰色尚可，灰色或黑色为保护不良（不允许）；焊接收尾时注意多填加焊丝，保证弧坑填满；切断电源后焊枪应在收尾焊缝上停留 3～5s 再停止供气，避免焊缝被氧化，焊接参数见表 9-13。

9.4 奥氏体型不锈钢与马氏体型不锈钢的焊接

9.4.1 焊接性

奥氏体型不锈钢与马氏体型不锈钢焊接时，突出的问题是在马氏体型不锈钢一侧焊接接头有淬硬倾向。加之由于异种钢各自的膨胀系数相差较大，焊接区的残余应力较大，因此裂纹倾向很大，焊接性较差[1]。

9.4.2 预热温度及回火温度

预热温度及回火温度的选择见表 9-11。

9.4.3 焊接材料

可以选用镍基焊接材料，但成本较昂贵。

用钨极氩弧焊焊接上述异种钢时可选用奥氏体不锈钢焊丝，如 H08Cr20Ni10Nb、H08Cr19Ni12Mo2 和 H12Cr24Ni13 等，也可选用与马氏体型母材金属成分相似的填充材料[1]。

9.4.4 焊接工艺

焊接时，首先要对马氏体型不锈钢待焊处进行焊前预热；焊接时宜采用较大的焊接电流和稍慢的焊接速度，焊条可做横向摆动，适当加宽焊道；焊后应进行缓冷，当冷却到 150～200℃时，适当进行高温回火[1]。

焊条电弧焊时，引弧要在引弧板上进行，不得在母材上随便引弧；焊接时焊条角度要正确，运条要平稳；电弧不宜过长；收弧时采用回焊收弧法填满弧坑，避免产生弧坑裂纹。焊条电弧焊的焊接参数见表 9-12。

表 9-12　用焊条电弧焊焊接异种不锈钢的焊接参数[1]

钢号	母材厚度/mm	焊条直径/mm	焊接空间位置		
			平焊焊接电流/A	立焊焊接电流/A	仰焊焊接电流/A
1Cr18Ni9Ti+12Cr13	0.5+0.5	2.0	50～70	45～65	30～50
	1.0+1.0	2.0	60～80	50～75	40～55
12Cr18Ni9+20Cr13	2.0+2.0	3.2	80～140	80～120	65～120
	4.0+4.0	4.0	90～160	90～150	80～140
	5.0+5.0	5.0	100～170	90～150	100～160
	6.0+6.0	5.0	120～180	120～160	100～160
07Cr18Ni11Nb+12Cr13	1.0+1.0	2.0	65～75	60～75	45～60
	1.5+1.5	3.2	60～80	55～75	50～80

用钨极氩弧焊焊接时，引弧时要提前 5～10s 送氩气；在引弧板上引燃电弧后，立即将电弧引入焊缝。异种不锈钢的薄板在熔化极气体保护焊（MIG）焊接时，采用短路过渡，中厚板焊接时可采用射流过渡。在焊接过程中要随时观察焊缝表面的颜色；银白色、金黄色为保护效果最好，蓝色为保护效果良好，红灰色为保护效果尚可，灰色或黑色为保护效果不良（不允许）；焊接收尾时注意多填加焊丝，保证弧坑填满；切断电源后焊枪应在收尾焊缝上停留 3～5s 再停止供气，避免焊缝被氧化。手工钨极氩弧焊的焊接参数见表 9-13。

表 9-13　异种不锈钢手工钨极氩弧焊的焊接参数[1]

母材厚度/mm	对接接头不加焊丝			对接接头加焊丝		
	焊接电流/A	电弧电压/V	氩气流量/(L/min)	焊接电流/A	电弧电压/V	氩气流量/(L/min)
0.5+0.5	30～50	10～18	3～4	35～60	10～18	3～4
0.8+0.8	40～55	10～18	3～4	40～70	10～18	3～4
1.0+1.0	45～60	10～20	3～4	45～75	10～20	3～4
1.5+1.5	50～80	10～20	4～5	55～85	10～20	4～5

续表

母材厚度/mm	对接接头不加焊丝			对接接头加焊丝		
	焊接电流/A	电弧电压/V	氩气流量/(L/min)	焊接电流/A	电弧电压/V	氩气流量/(L/min)
2.0+2.0	75～120	11～21	5～6	80～125	11～21	5～6
2.5+2.5	80～130	11～22	6～7	85～135	12～22	6～7
3.0+3.0	100～140	12～22	6～7	110～150	12～22	6～7

9.4.5 工程实例 3Cr13 与 1Cr18Ni9Ti 异种钢高压管焊接[7]

某厂高压水罐水位器中高压管是由中段 1Cr18Ni9Ti 无缝不锈钢管与两端 3Cr13 钢管连接件焊接而成的，如图 9-6 所示。钢管规格为ϕ60mm×8mm。

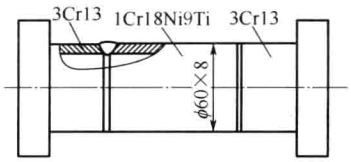


图 9-6 异种钢高压管示意图

(1) 焊接性分析

这两种材料的铬当量、镍当量计算见表 9-14。借助于舍夫勒组织图（见图 9-1），可以知道这两种材料的组织和焊缝金属的金相组织：3Cr13 组织为 A＋M；1Cr18Ni9Ti 组织为A＋(0%～5%)F；若不加填充金属，焊缝金属组织为 A＋M。马氏体组织是又硬又脆的组织，在焊接接头上易形成裂纹。A307 焊条的熔敷金属铬和镍的当量均很高，当熔合比在 30%～40%时，焊缝金属可获得 A＋F 组织。选用 A307 牌号焊条进行这两种金属焊接是可行的。

注：3Cr13 不锈钢最新标准的牌号为 30Cr13。

表 9-14 有关材料和焊条的铬、镍当量

材料	化学成分(质量分数)/%					Cr_{eq}/%	Ni_{eq}/%
	C	Mn	Si	Cr	Ni		
3Cr13	0.3	0.6	0.6	13		13.9	9.9
1Cr18Ni9Ti	0.12	2.0	1.0	18	9	19.5	13.6
A307 焊条	0.11	1.32	0.48	24.8	12.8	25.52	16.76

(2) 焊前准备

焊接坡口形式如图 9-7 所示。待焊处要清理干净。因管内的介质是高压水，因此焊接时以防止裂纹为主要目的，防止晶间腐蚀则为次要目的，焊前对 3Cr13 钢管进行预热，预热到 250～350℃后立即进行定位焊和正式焊。管子进行水平转动焊接。

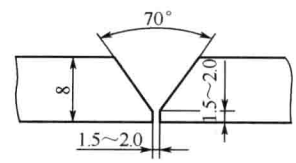


图 9-7 焊接坡口形式和尺寸

(3) 操作工艺

采用直流反极性电源进行焊接。第一层焊缝采用灭弧（亦称闪弧或断弧）焊法，达到单面焊双面成形的目的，焊条直径为ϕ3.2mm，焊接电流 90A；焊接第二、三层焊缝时，道间温度不大于 400℃，焊条选用ϕ4.0mm，焊接电流为 100～150A，焊缝余高控制在 1～2mm，焊后加热至 850℃用石棉保温、缓冷。

焊缝经外观检查和 X 射线检测合格后，用于生产。

9.5 不同钢号的奥氏体型不锈钢的焊接

在电站或化工、炼油等工业中有许多炉管，按照管路化工流程的工作温度或工作介质、环境变化不同，选用不同钢号的奥氏体型不锈钢作为炉管材料，其目的是既要保证不同高温段的高温稳定性（选择耐热奥氏体不锈钢），同时保证腐蚀段炉管的耐蚀性（选用耐酸奥氏体不锈钢）。这样就出现了不同奥氏体不锈钢焊接接头。

不同钢号的奥氏体型不锈钢焊接时主要焊接问题是焊缝和近缝区可能会产生热裂纹[1]。要根据焊接接头的实际工况来考虑其焊接性，以保证工件性能良好。如果在腐蚀介质中工作的，其主要矛盾是焊缝或近缝区可能产生晶间腐蚀；如果长期在高温条件下服役，则应着重考虑焊接接头的耐热性、热强性、焊缝析出 σ 相脆化等问题。奥氏体型不锈钢焊缝的性能主要取决于其化学成分。为此，要重视焊接材料的选用，严格控制焊接材料中硫、磷的含量，焊后热处理参数。所选用的焊接材料，应使焊缝金属中含有一定数量的铁素体组织，以有利于克服焊缝热裂纹倾向，也有利于减少晶间腐蚀的可能；控制焊缝金属中碳的含量；焊缝中添加碳化物稳定合金元素或者焊后进行固溶或稳定化处理，可以防止晶间腐蚀的产生；为了避免工件在高温下铁素体发生 σ 相转变，焊缝金属中铁素体的数量不宜过高。其体积分数为 2.5%～5.0%[1]。

有关不同钢号奥氏体型不锈钢焊接时，焊条、预热和回火温度的选择见表 9-15。

表 9-15　焊接不同牌号奥氏体不锈钢焊条及其预热、回火温度的选择[1]

钢材组合	焊条型号	预热	焊后回火	备注
X＋X	E316	不预热	不回火或 950～1050℃稳定化处理	在无浸蚀液介质或非氧化性介质中可在 360℃以下使用。焊后经奥氏体稳定化处理晶间腐蚀可通过 GB/T 4334.5—2000 试验。在不含硫的气体介质中，能耐 750～800℃高温
	E316L			在 360℃以下，在无氧化性介质中，焊后不做敏化处理和奥氏体稳定化处理，晶间腐蚀可通过 GB/T 4334.5—2000 试验
	E318			在无氧化性过热蒸汽（500℃）下使用。经过奥氏体稳定化处理后，必须进行晶间腐蚀试验
	E347		不回火或在 870～920℃下回火	可用于氧化性浸蚀液介质中，焊后不经奥氏体敏化处理，可通过 GB/T 4334.5—2000 试验。焊后经 870～920℃奥氏体稳定化处理，敏化处理可通过 GB/T 4334.5—2000 试验。1000～1150℃奥氏体稳定化处理可通过 GB/T 4334.3—2000 试验
X＋Ⅶ	E318V		不回火或在 870～920℃下回火	在不含硫的气体介质中，可在 750～800℃下具有热稳定性，需要消除焊接残余应力时才采用回火
X＋Ⅷ	E316		不回火或 950～1050℃稳定化处理	用于温度在 360℃以下的非氧化性液体介质中。焊后状态或经奥氏体稳定化处理后，具有抗晶间腐蚀性能

续表

钢材组合	焊条型号	预热	焊后回火	备注
Ⅹ＋Ⅷ	E347	不预热	不回火或在870～920℃下回火	用于氧化性液体介质中，经奥氏体敏化处理后，可通过GB/T 4334.3—2000试验。在610℃以下具有热强性
	E318V			用于无侵蚀性液体介质中，在600℃以下具有热强性
Ⅹ＋Ⅻ	E309			在不含硫的气体介质中，在1000℃以下具有热稳定性
Ⅻ＋Ⅷ	E309			在不含硫的气体介质中，或无侵蚀性液体介质中，在1000℃以下具有热稳定性，焊缝不耐晶间腐蚀
	E347			用于w_{Ni}少于16%的钢材。650℃以下具有热强性。在不含硫的气体介质中，温度在750～800℃具有热稳定性
	E318V			用于w_{Ni}少于16%的钢材。600℃以下具有热强性。在不含硫的气体介质中，温度在750～800℃具有热稳定性
	E16-25MoN			用于w_{Ni}在35%以下，而又不含Nb的钢材，700℃以下具有热强性
Ⅷ＋Ⅷ	E318		870～920℃	600℃以下具有热强性
	E347		870～920℃	用于w_{Ni}少于16%的钢材。650℃以下具有热强性
	E16-25MoN		870～920℃	用于w_{Ni}在35%以下，而又不含Nb的钢材。700℃以下具有热强性，可能使用于深冷(－150℃)条件

9.6 铁素体型不锈钢与碳素钢的焊接

9.6.1 焊接性

施焊过程中由于焊接热循环的作用，在铁素体不锈钢一侧的热影响区会引起晶粒长大，造成脆化。并随着钢中铬含量的增加，高温停留时间延长，焊接接头的脆化倾向会更严重。碳素钢一侧焊缝的不均匀混合区组织和性能，由合金元素的浓度来决定，可能出现硬脆的马氏体组织，导致塑性和韧性下降，有裂纹倾向。因此，这两种钢的焊接性较差[1]。

9.6.2 焊接工艺措施

为了实现这两种金属的优质焊接接头，在焊接工艺上应采取下述必要措施。

① 对于含铬量较低的铁素体型不锈钢，焊接前在其待焊处一侧可用E5015-B1或E5015-B2焊条堆焊一层过渡层。堆焊之前必须预热，预热温度为200～300℃。然后再用E4315、E4316或E5015焊条将过渡层与碳素钢焊成一体。含铬量高($w_{Cr}\geqslant17\%$)的铁素体型不锈钢与碳素钢焊接时，为了防止焊缝产生热裂纹，可以采用奥氏体不锈钢焊接材料进行施焊，一般情况可以不预热，如果需要预热，预热温度为150～200℃。

② 焊接参数选用小的热输入，施焊过程中焊条、焊枪不做横向摆动，以窄焊缝为宜[1]。

③ 多层焊时，待前道焊缝冷却到预热温度后再焊下一道焊缝，道间温度控制在 100℃最好。如果道间温度过高，会出现焊缝在高温停留时间过长，而造成严重脆化。

④ 对于厚度大或刚度较大的焊接结构，要设计合理的焊接接头和坡口形式，希望焊后变形量小，焊接应力亦小。每道焊缝或每层焊缝焊接完毕后可用小锤轻轻锤击焊缝周围，以利于释放焊接应力。

⑤ 焊后应及时进行回火处理，以使焊缝组织均匀化，提高焊缝的塑性和耐蚀性。回火处理温度应控制在 750℃以下。

铁素体型不锈钢与碳素钢焊接可采用焊条电弧焊、CO_2 气体保护焊和埋弧焊等焊接方法。焊条电弧焊焊接时，选用的焊条、预热温度和焊后热处理温度见表 9-16。

表 9-16　铁素体不锈钢与珠光体钢焊接时焊条、预热和热处理温度的选择

钢材组合	焊条型号	预热/℃	焊后回火/℃	备注
Ⅰ＋Ⅶ	E5503-B1 E5515-B1 E5515-B2	300～400	650～680	工作温度在 350℃以下，焊后立即回火
	E309	150～200	不回火	焊后无法进行处理时采用
Ⅰ＋Ⅷ	E309	不预热		焊件不耐晶间腐蚀，不能受冲击载荷，不能用于侵蚀性液体介质
Ⅱ＋Ⅶ	E5503-B1 E5515-B1 E5515-B2	300～400	650～680	工作温度在 350℃以下，焊后立即回火
	E309	150～200	不回火	焊后无法进行处理时采用
Ⅱ＋Ⅷ	E309	不预热		焊件不耐晶间腐蚀，不能受冲击载荷，不能用于侵蚀性液体介质，焊后无法进行处理时采用
Ⅲ＋Ⅶ	E16-25Mo6N6	150～200		焊后无法进行处理时采用，工作温度在 350℃以下，焊后立即回火
Ⅲ＋Ⅷ	E16-25Mo6N6	不预热	不回火	焊缝不耐晶间腐蚀，不能用于侵蚀性液体介质。焊后无法进行处理时采用
	E316	不预热		工件在侵蚀性液体介质中工作时，将 E316 焊条堆焊在 E16-25Mo6N6 焊缝表面，以便与侵蚀性液体接触，保护 E16-25Mo6N6 的焊缝
Ⅳ＋Ⅶ	E5503-B1 E5515-B1	300～400	620～660	工作温度在 350℃以下，焊后必须立即回火
Ⅳ＋Ⅷ	E309	250～300	不回火	焊缝不耐晶间腐蚀，不能在侵蚀性液体介质中使用，工作温度不得超过 350℃
Ⅴ＋Ⅶ	E5515-B2	300～400	680～720	工作温度在 350℃以下，焊后必须立即回火
Ⅴ＋Ⅷ	E309	不预热或 150～200	不回火	焊缝不耐晶间腐蚀，不能在侵蚀性液体介质中使用，不能受冲击载荷
Ⅵ＋Ⅶ	E5515-B2 E5515-B2-V	300～400	720～750	工作温度在 540℃，内部焊缝用 E5515-B2 焊接，而焊缝的表面用 E5515-B2-V 覆盖，焊后必须立即回火
Ⅵ＋Ⅷ	E309	150～200	不回火	焊缝不耐晶间腐蚀，不得在侵蚀性液体介质中使用，不能受冲击载荷，工作温度在 500℃以下

9.6.3 工程实例 1Cr17 与 Q235 的焊条电弧焊

（1）焊接接头形式和坡口的选择

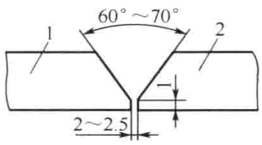


图 9-8 铁素体不锈钢与碳素钢的坡口形式

1—1Cr17 钢；2—Q235 钢

这两种钢焊接结构的焊接接头尽量采用对接接头，避免采用 T 形接头。

通常采用 V 形坡口，其坡口尺寸见图 9-8。由于铁素体型不锈钢液体金属的流动性比奥氏体型不锈钢差，为了保证充分焊透，坡口间隙要大一些，通常为 2～2.5mm。

（2）焊接方法的选择

这两种钢的焊接方法可采用焊条电弧焊、埋弧焊、CO_2 气体保护焊和氩弧焊等，其焊接材料、焊前预热和焊后热处理参数的选择，见表 9-17。

表 9-17 1Cr17 钢与 Q235 钢的焊接方法和焊后热处理参数的选择[1]

焊接方法	焊接材料		预热温度/℃	焊后热处理/℃
	焊条型号	焊丝牌号		
焊条电弧焊	E5515-B1 E5515-B2-VW E5515-B2-V	—	不预热	680～700 回火
埋弧焊	—	H10CrMoA(焊剂 HJ431) H08CrMoVA(焊剂 HJ431)	不预热	650～700 回火
CO_2 气体保护焊	—	H08CrNi2MoA H08CrMoVA ψ_{CO_2} 气体(纯度)99.8%	不预热	650～680 回火或 680～700 回火
氩弧焊	—	H08CrNi2MoA H08CrMoVA ψ_{Ar} 气体(纯度)99.8%	不预热	680～700 回火

（3）焊接工艺

铁素体型不锈钢与碳钢焊接时，为了防止铁素体型不锈钢一侧焊缝晶粒粗大，产生脆化和裂纹，在焊接工艺上应采取下列措施。

① 选用小的热输入，小的焊接电流，较快的焊接速度。

② 采用短弧焊，电弧稍倾向碳钢母材金属侧，使两母材金属受热均匀一致。

③ 多层焊，待前一层焊缝冷却到室温后再焊下一道焊缝。

④ 焊后进行缓冷。

9.7 铁素体型不锈钢与马氏体型不锈钢的焊接

9.7.1 焊接特点

在焊接过程中会发生合金元素扩散和碳迁移，对焊接接头热影响区的性能极为不利。在马氏体型不锈钢焊缝一侧的热影响区形成低塑性组织；在铁素体型不锈钢一侧焊缝晶粒长大过快，使冲击韧度严重降低。因此，在焊接工艺中必须采取措施防止马氏体型不锈钢焊接接头的近缝区由于塑性太低而产生裂纹，同时又要考虑到铁素体型不锈钢焊接接头的热影响区冲击韧度值降低太多而使焊接结构遭到破坏的问题。

9.7.2 焊接工艺

（1）焊接方法

这两类钢焊接时通常采用焊条电弧焊，也可以采用气体保护电弧焊。

（2）焊接材料的选择

为了防止近缝区产生裂纹，应从焊接材料选择方面着手。焊接这两类钢时，可选用与铁素体型不锈钢化学成分相近的 E410、E410NiMo 和 E430 焊条；也可以选用与马氏体型不锈钢化学成分相近的 E11MoVNi 和 E11MoVNiW 焊条。气体保护焊时，可选 H1Cr23 焊丝；也可选用与这两类材料之一成分相同的焊丝或剪切板料作为填充金属。

采用奥氏体不锈钢焊条焊接时，焊缝金属可获得奥氏体组织，对防止裂纹是有利的，而且焊前可不预热。但奥氏体不锈钢焊缝强度大大低于这两类钢的强度，不能与母材金属等强；在进行焊后热处理时，在马氏体型不锈钢焊缝一侧肯定会发生碳的迁移，同时奥氏体不锈钢焊缝的线胀系数比马氏体型不锈钢大 50%左右，使马氏体型不锈钢一侧焊缝的组织产生很大的内应力，为形成冷裂纹创造了条件。所以奥氏体不锈钢焊接材料的应用受到限制，只有在焊接结构无法进行热处理，焊接构件仅受静载荷力，且作用于焊接构件的压力不很大的情况下，才能选用此类焊接材料。

（3）焊接参数

对于铁素体型不锈钢焊接，要求用小的热输入，而马氏体型不锈钢焊接时要求大的热输入，两者很难兼顾。所以这两类钢焊接之前，必须在保证焊接接头不产生裂纹的前提下，对焊接参数进行调整，根据结构使用情况，制订出一个主要满足一种类型钢焊接的焊接参数[1]。

（4）预热与热处理

焊接这两类钢时，除了使用奥氏体不锈钢焊接材料可以不预热外，选用其他焊接材料施焊前必须进行预热，预热温度按马氏体型不锈钢确定。预热温度过高，对铁素体型不锈钢不利，会使铁素体型不锈钢焊缝一侧过热或晶粒粗化而降低其力学性能。这两类钢焊接后要进行热处理，热处理参数按马氏体型不锈钢确定，即焊后缓冷到 100～150℃，保温 0.5～1h 后再回火处理，温度控制在 750℃以下。

有关铁素体型不锈钢与马氏体型不锈钢焊接时，焊接材料与热处理参数的选择见表 9-18。

表 9-18　铁素体型不锈钢与马氏体型不锈钢焊接材料与热处理参数的选择[1]

钢材组合	焊接材料	预热温度/℃	回火温度/℃	备　注
Ⅶ＋Ⅷ	E410，H1Cr23	200～300	700～740	
	E309，H1Cr24Ni13	不预热	不回火	
Ⅶ＋Ⅸ	E410 E11MoVNi， E11MoVNiW	350～400	700～740	焊后保温缓冷后，立即回火处理
	E309	不预热	不回火	
Ⅷ＋Ⅸ	E430 E11MoVNi， E11MoVNiW	350～400	700～740	焊后保温缓冷后，立即回火处理
	E309Mo	不预热	不回火	

注：钢材组合见表 9-1。

9.8 马氏体型不锈钢与珠光体钢的焊接

9.8.1 马氏体型不锈钢与珠光体钢的焊接性

马氏体型不锈钢与珠光体钢的焊接性，主要取决于马氏体型不锈钢的特性。马氏体型不锈钢在常温下的组织多为硬脆的马氏体，所以焊接性很差，它也是这两类钢焊接接头易产生冷裂纹和脆化现象的主要原因[1]。随着钢中含碳量的增高以及结构厚度和拘束度的增大，冷裂纹倾向增大。由于焊接热循环的作用，马氏体型不锈钢有较大的过热倾向，晶粒易粗化，热影响区会出现粗大的铁素体和碳化物组织，塑性降低，冷却时能引起脆化，如果再有氢的作用，冷裂纹倾向就更加明显。

这两类钢焊接时同样存在焊缝稀释和形成过渡层的问题，导致珠光体钢一侧焊缝形成脱碳层，而马氏体钢一侧焊缝引起增碳层；随着扩散的持续，使原来珠光体钢焊缝一侧的碳含量降低，变成了铁素体组织，并使该焊接接头的焊缝组织成为奥氏体+铁素体。铁素体的晶粒粗大而软化，最后会出现低塑性或低应力或两者兼备的区带，极容易遭到破坏。有关马氏体不锈钢（20Cr13）与珠光体钢（25 钢）的焊缝及热影响区的组织与预热温度之间的关系见表 9-19。

为了克服上述焊接问题，焊接时需遵守 9.8.1～9.8.5 的技术要求。

表 9-19 20Cr13 钢与 25 钢的焊缝、热影响区组织与预热温度之间的关系[1]

异种金属名称	焊缝组织	热影响区组织	焊缝硬度（HBW）	热影响区硬度（HBS）	预热温度/℃
20Cr13+25	奥氏体+铁素体	20Cr13 钢侧：马氏体 25 钢侧：马氏体+贝氏体	592 572	279 279	不预热
20Cr13+25	奥氏体+铁素体	20Cr13 钢侧：马氏体 25 钢侧：贝氏体	560 548	270 270	200
20Cr13+25	奥氏体+铁素体	20Cr13 钢侧：马氏体 25 钢侧：贝氏体	520 518	270 270	300
20Cr13+25	奥氏体+铁素体（ϕ_F3%～5%）	20Cr13 钢侧：回火马氏体+铁素体 25 钢侧：回火马氏体+铁素体	357 483	260 260	350

9.8.2 焊接材料的选用

为了保证结构使用性能的要求，焊缝金属成分力求接近于其中一种钢的成分。例如马氏体不锈钢（1Cr13）和珠光体钢（Q235）采用焊条电弧焊时，选用 J502（E5003 型）焊条施焊，焊缝金属 w_{Cr}为 5%～6%，经回火处理后具有良好的力学性能；选用 G307（E430 型）焊条施焊，焊缝金属中 w_{Cr}增至 6%～11%，而焊缝金属的塑性及韧性比结构钢焊条低，其抗裂性也较差；若选用与这两类钢完全不同成分的奥氏体不锈钢焊条来焊接时，焊缝金属可得到奥氏体组织，其抗裂性能较好，但是回火热处理过程中，容易产生碳的迁移，且奥氏体不锈钢的线胀系数比马氏体型不锈钢约大 50%，使焊缝组织产生较大的内应力，促使冷裂纹的形成，这是不可取的。所以应避免使用奥氏体不锈钢焊接材料来焊接上述两类钢，特别是受压元件的焊接接头更不能用它作为焊接材料。

某电力公司采用马氏体耐热不锈钢 F12（X20CrMoV12-1）与珠光体耐热钢 15Cr1Mo1V（见表 9-20）焊接，选用 R407（E6015-B 型）、R337（E5515-1CMVNb 型）和 R817（E11MoVNiW 型）几种牌号焊条（其熔敷金属的化学成分见表 9-21）进行了对比试

验。所焊成的焊接接头进行回火处理（740℃，保温 2h），然后经 550℃时效处理时，选择不同的保温时间，分别进行对比。发现 R337 焊条焊成的上述异种钢焊接接头，经过回火处理，再进行 550℃时效处理，保温时间分别为 72h、144h、215h、288h 及 430h，均未发现脱碳层和增碳层。这是由于 R337 焊条中含有铌的碳化物形成元素，对防止碳扩散有较明显的效果，其力学性能也较好（冲击韧度值 a_k＞100J/cm²，硬度＞250HBS）。为了保证其焊缝的高温强度与马氏体不锈耐热钢相当，要求焊缝中心厚度必须达到马氏体不锈耐热钢管壁厚度的 1.2 倍。其他两种焊条的焊缝在 15Cr1Mo1V 钢一侧均出现程度不一的脱碳层[1]。

表 9-20　两种钢材的化学成分[1]

钢号	化学成分(质量分数)/%								
	C	Si	M	S	P	Cr	Ni	Mo	V
F12 (X20CrMoV12-1)	0.17～ 0.23	0.10～ 0.50	0.30～ 0.80			11.0～ 12.5	0.30～ 0.80	0.8～ 1.20	0.25～ 0.35
15Cr1Mo1V	0.08～ 0.15	0.17～ 0.37	0.4～ 0.7			0.9～ 1.2		1.0～ 1.2	0.15～ 0.25

表 9-21　几种焊条型号的熔敷金属的化学成分[1]

焊条型号	熔敷金属化学成分(质量分数)/%										
	C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	P	S	Cu	V	W
E5515-B2-VNb	0.05～ 0.12	0.80～ 1.50	—	0.70～ 1.00	0.90	0.60	0.035	0.035		0.15～ 0.40	Nb:0.10～ 0.25
E6015-B3	0.05～ 0.12	2.00～ 2.50	—	0.90～ 1.20	0.90	0.60	0.035	0.035	—	—	—
E11MoVNiW	0.19	9.5～ 12.0	0.40～ 1.10	0.80～ 1.00	0.5～ 1.0	0.50	0.035	0.030	0.5	0.20～ 0.40	0.40～ 0.70

9.8.3　坡口形式

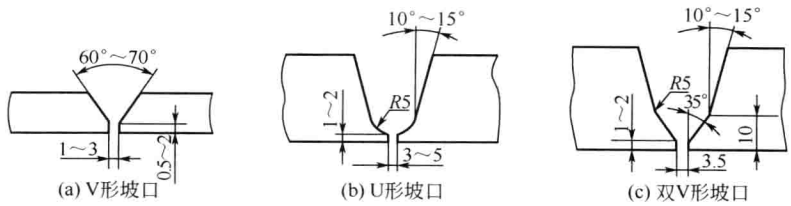
马氏体不锈钢常作为耐热钢使用，珠光体耐热钢大多是电站锅炉主蒸汽管、过热器、再热器集箱和再热蒸汽管道的材料。这些场合对管子对接焊时的坡口形式要求严格，既要便于操作，又要保证焊缝质量，避免焊缝根部出现缺陷。

重要管道常见的坡口形式有 V 形、U 形和双 V 形三种基本类型，见图 9-9。

V 形坡口：在管道端部加工成 30°～35°斜边的 V 形坡口，这是常用的一种坡口，其加工最为简单，适用于管壁厚度小于 16mm 的管道对接焊，如图 9-9(a) 所示。

U 形坡口：适用于壁厚大于 16mm 的要求严格的焊接接头。这种坡口在各种位置上均具有操作方便、掌握容易、填充金属少的优点，所以在管道焊接中常用，如图 9-9(b) 所示。

双 V 形坡口：把管壁分成两层［图 9-9(c)］，靠内壁 10mm 部分开 V 形坡口，外壁部分为 10°～15°的小坡口；在内外层交界处用 R5mm 圆弧过渡。它具有 V 形和 U 形坡口的优



(a) V形坡口　(b) U形坡口　(c) 双V形坡口

图 9-9　管道中常见的坡口形式

点，是一种比较理想的坡口形式，近年来在大、中型机组厚壁管上已得到应用。但这种坡口要求在一个斜面上有两个不同的角度和圆弧，加工比较复杂，故大量采用尚有一定难度。

9.8.4 预热温度与道间温度

焊前预热温度和道间温度的控制对减少裂纹的形成有一定的影响；预热温度按马氏体型不锈钢要求选择，要控制在300～400℃，道间温度也要控制在这个温度范围内。预热温度过高，会导致焊缝的冷却速度变慢，有可能引起焊接接头晶粒边界碳化物的析出和形成铁素体组织。这种碳化物＋铁素体的组织，会大大降低焊接接头的冲击韧度。预热温度过低，则达不到对材质的预热目的，无法防止裂纹的形成[1]。

9.8.5 焊后温度的控制及热处理

以马氏体型不锈钢确定其焊后保温措施及热处理参数。焊后必须缓慢冷却至100～150℃，保温0.5～1.0h，使焊接接头的组织全部转变成马氏体，随后才能升温，进行热处理。

热处理温度一般选择在720～780℃范围内，保温时间按焊件的壁厚确定，一般控制在2～5h范围内。如果回火温度偏低，则回火效果不显著，不能使焊接接头的组织发生转变，也不能消除马氏体转变的组织应力；但回火温度过高，超过马氏体型不锈钢相变温度，在冷却过程中又会重新淬硬，使焊接接头冲击韧度值大大降低。

9.8.6 焊接方法、操作工艺及注意事项

焊接方法、操作工艺及注意事项与马氏体不锈钢焊接相同。

9.8.7 工程实例 1Cr13 与 Q235 的电弧焊

（1）焊接材料的选择

这两种钢焊接时，可采用焊条电弧、埋弧焊、CO_2 气体保护焊和混合气体保护电弧焊。采用混合气体保护焊时，混合气体的体积分数（%）有下列几种类型：Ar98%＋$CO_2$2%；Ar40%＋$CO_2$60；He40%＋$CO_2$60%；He20%＋$CO_2$80%；Ar75%＋$CO_2$23%＋$O_2$2%。这些配比都能有效地防止焊缝污染，获得最佳的焊缝外观。

（2）焊接工艺

为了防止这两种钢号的焊接接头形成冷裂纹和脆化，焊前必须预热；为了提高焊接接头的力学性能，焊后应进行热处理。

有关1Cr13与Q235两种异种钢的焊接方法、焊接材料和焊后热处理参数的选择见表9-22。

表9-22 1Cr13钢与Q235钢焊接方法、焊接材料和焊后热处理参数的选择[1]

焊接方法	焊接材料		预热温度/℃	焊后热处理参数
	焊条型号	焊丝牌号		
焊条电弧焊	E5015 E309		150～300	700～730℃回火
埋弧焊	—	H10MoCrA 焊剂 HJ431	150～300	700～730℃回火
CO_2 气体保护焊	—	H08CrNi2MoA φ_{CO_2} 气体(纯度)99.8%	150～300	700～730℃回火
混合气体保护电弧焊	—	H08CrNi2MoA (Ar98%＋$CO_2$20%)	150～300	700～730℃回火焊后冷至100～150℃然后升温至680～700℃回火

9.9 不锈复合钢板的焊接

不锈复合钢板是由覆层（不锈钢）和基层（碳钢或低合金钢）贴合（一般采用爆炸或塞焊）成一体的双金属。它广泛用于石油、化工、制药、制碱和航海等工业的防腐耐高温的容器和管道等。

9.9.1 对不锈复合钢板的要求

覆层用不锈钢板的钢号有：06Cr25Ni20（0Cr25Ni20）、6Cr13（0Cr13）、06Cr13Al（0Cr13Al）、022Cr17Ti、06Cr19Ni10（0Cr19Ni9）、06Cr19Ni11Ti（0Cr18Ni11Ti）、06Cr17Ni12Mo2（0Cr17Ni12Mo2）、022Cr17Ni12Mo2（00Cr17Ni14Mo2）、06Cr23Ni13（0Cr23Ni13）、022Cr19Ni5Mo3Si2N（00Cr18Ni5Mo3Si2）、022Cr25Ni7Mo4N、022Cr22Ni5Mo3N 等。基层用钢板有 Q235A、Q235B、Q235C、Q345A、Q345B、Q345C、Q245R、Q345R、15CrMoR、09MnNiDR、08Al 等[8]。

不锈复合钢板的覆层和基层的化学成分要符合其各自钢号的化学成分。我国爆炸复合不锈钢板的力学性能见表 9-23，热轧不锈复合钢板的力学性能见表 9-24。冲击吸收能量应符合基材产品标准的规定。不锈复合钢板的弯曲试验应满足表 9-25 的要求。

表 9-23　爆炸复合不锈钢板的力学性能[9]

屈服强度 R_{eL}/MPa	抗拉强度 R_m/MPa	断后伸长率① A/%	剪切强度 τ/MPa
$R_{eL}\geqslant(R_{e1}t_1+R_{e2}t_2)/(t_1+t_2)$ 式中 R_{e1}——覆材屈服强度下限值，MPa R_{e2}——基材屈服强度下限值，MPa t_1——覆材厚度，mm t_2——基材厚度，mm	$R_m\geqslant(R_{m1}t_1+R_{m2}t_2)/(t_1+t_2)$ 式中 R_{m1}——覆材抗拉强度下限值，MPa R_{m2}——基材抗拉强度下限值，MPa t_1——覆材厚度，mm t_2——基材厚度，mm	不小于基材标准值	≥210

① 当覆层材料断后伸长率小于基材伸长率标准值时，允许复合钢板伸长率小于基材标准值，但不得小于覆材标准值。此时应补充进行一个基层试样的拉伸试验，其伸长率不小于基材标准值。

表 9-24　热轧不锈复合钢板的力学性能[10]

屈服强度① R_{eL}/MPa	抗拉强度 R_m/MPa	断后伸长率② A/%	剪切强度 τ/MPa
$R_{eL}\geqslant(R_{e1}t_1+R_{e2}t_2)/(t_1+t_2)$ 式中 R_{e1}——覆材屈服强度下限值，MPa R_{e2}——基材屈服强度下限值，MPa t_1——覆材厚度，mm t_2——基材厚度，mm	$R_m\geqslant(R_{m1}t_1+R_{m2}t_2)/(t_1+t_2)$ 式中 R_{m1}——覆材抗拉强度下限值，MPa R_{m2}——基材抗拉强度下限值，MPa t_1——覆材厚度，mm t_2——基材厚度，mm	不小于基材标准值	R1、R2 级 ≥220 R3 级 ≥210

① 当屈服不明显时，可以采用 $R_{p0.2}$ 代替。

② 当覆层材料断后伸长率小于基材标准值时，允许复合钢板伸长率小于基材标准值，但不得小于覆材标准值。此时应补充进行一个基层试样的拉伸试验，其伸长率不小于基材标准值。

注：R1，不允许未结合区存在，未结合率为 0；R2，单个未结合区长度不大于 50mm、面积不大于 2000mm²，未结合率不大于 1%；R3，单个未结合区长度不大于 75mm、面积不大于 4500mm²，未结合率不大于 4%。

表 9-25 不锈复合钢板弯曲试验[10]

厚度/mm	试样宽度 b/mm	弯曲角度/(°)	弯芯直径 d	内弯、外弯，180°
≤25	$b=2a$，且 $b\geqslant 20$	180	$a<20\text{mm}$ $d=2a$ $a\geqslant 20\text{mm}$ $d=3a$	在弯曲外侧不得产生裂纹；复合界面不允许分层
>25	$b=2a$	180	加工基层厚度至 25mm，弯芯直径按基层钢板标准值	

注：a 为复合钢板总厚度。

不锈复合钢板覆层表面不得有气泡、结疤、裂纹、夹杂、折叠等缺陷，允许研磨清除上述缺陷，但清除后，应保证最小厚度，否则应进行补焊。基层表面质量应符合相应标准的规定。

复合钢板应根据需方要求，按相应标准的规定进行晶间腐蚀检验。

9.9.2 不锈复合钢板的焊接性

不锈复合钢板是由化学成分和物理性能有很大差异，焊接性也有重大差异的两层钢材组合而成的，因而不可能用单一焊接材料和焊接工艺进行焊接，而应将基层和覆层区别对待。如果单独采用适合于基层的焊接材料和焊接工艺，则焊接覆层时会出现马氏体钢的焊缝，不仅力学性能不良，还容易产生焊接裂纹，而且完全丧失了覆层应有的耐蚀性；如果采用单一适合于覆层的不锈钢焊接材料进行施焊，虽然易于得到腐蚀性能合格的覆层表面，然而基层焊缝金属却完全由高、中合金水平的马氏体钢成分组成，其焊接裂纹倾向非常大，而且其塑性、强度等级不能同钢板整体协调，以至在载荷作用下会出现不连续的应力状态，可能诱发断裂失效。

不锈复合钢板焊接应遵守的基本原则：应尽可能将基层焊接同覆层的焊接区分开，尽量减少两种材料的熔合；覆层焊缝金属的成分应当尽量与覆层钢板相同；为保证过渡层能完成化学成分由基层到覆层的过渡，很重要的是选择焊接材料和稳定工艺参数及保证熔合比。

往往为了减少覆层不锈钢成分对基层焊接的影响，可将接头区的覆层铲除，待基层完全焊好后再在其上堆焊过渡层，然后进行覆层的焊接。

为保证焊接接头有良好的耐腐蚀性，通常应当避免焊后再次或多次受热。因此在焊接不锈复合钢板时，一般应先焊接基层，后焊接覆层，以保证覆层的良好耐蚀性。只要坡口适当，可以做到完全避免覆层金属熔入基层焊缝金属。这样，基层焊接时，只要按照基层钢板的焊接性处理就行了。即使在高温工况下服役的不锈复合钢板构件，其基层属于低合金耐热钢，焊接问题也并不十分复杂。

根据对覆层不锈钢的性能要求（通常是耐蚀性要求），覆层焊缝金属的成分应当尽量与覆层钢板相同。这里要同时考虑另外两个方面的问题：一是要考虑覆层钢板本身存在的焊接性问题，例如，在生产中为防止焊缝出现热裂纹，将焊缝的金属成分稍稍偏离钢板成分，以换取含有少量铁素体相的组织；二是要考虑基层钢板对焊缝金属的稀释作用，因为覆层焊接是在基层焊缝的基础上开始的，并且还必须保证基层同覆层之间有良好的焊接性，同时由于覆层较薄，焊接的层数有限，这种稀释作用是难以避免的。为了克服这一缺陷，合理的办法是在基层同覆层的接合面处焊接一个过渡层，完成由基层到覆层的成分过渡。这样一来，从过渡层上开始的覆层焊接，就比较接近于该种不锈钢板的焊接。

不锈复合钢板焊接的关键问题在于处理好覆层与基层交界部位的焊接性，也就是过渡层

（又称隔离层）的问题。为保证过渡层能完成化学成分由基层到覆层的过渡，很重要的是选择焊接材料和稳定工艺参数及保证熔合比。这些原则同前面讨论的异种材料焊接是一样的。不过此时碳钢（基层）的熔入量和不锈钢（覆层）的熔入量，不会像异种材料对接焊缝那样两者相近，而可能由于坡口形式和操作技术（例如电弧在复合界面上、下的偏置和停留）的不同而有差异。

表 9-23、表 9-24 提出对不锈复合钢板的层间结合强度有一个对界面抗剪强度的要求，这是因为该接合面完全是平板与板面的熔合，不存在拉伸应力。不锈复合钢焊接接头的过渡层大体平行于板面，但有一定的厚度。所以在考虑过渡层与覆层、基层的两个熔合区和焊缝金属时，要使它们均达到对不锈复合钢板所要求的界面抗剪强度。过渡层的厚度较厚时，还要考虑熔合区和焊缝金属都具有相当的抗拉强度，因为熔合线实际上不是一根直线，而是一个曲面，并非处于与板面平行的位置。所以说，不锈复合钢板焊接的过渡层宜薄不宜厚。值得注意的还有，由于不锈钢同碳钢（或低合金结构钢）之间的热物理性能（特别是膨胀系数）差别较大，为了防止焊后冷却过程中或以后服役过程中因温差应力而开裂，应当保证过渡层具有优良的塑性和韧性，对应力起阻碍作用，以减缓应力对两金属交界面的有害作用，避免焊接接头产生裂纹。同时，还要求熔合区的不均匀混合层力求均匀一致，以减少稀释程度。

9.9.3　不锈复合钢板的焊接工艺

（1）焊接方法的选择

不锈复合钢板基层或覆层的焊接方法与焊接不锈钢和碳钢（或低合金结构钢）一样，可以采用焊条电弧焊、埋弧焊、CO_2 气体保护焊和惰性气体保护焊等方法。但覆层常用焊条电弧焊焊接。

（2）焊接材料的选择

不锈复合钢板的焊缝由过渡层（又称隔离层）、基层和覆层三个部分组成，各自焊接材料的选择如下。

① 过渡层所选用的焊接材料。过渡层焊接材料按下列原则选用[11]。

a. 不锈钢复合钢过渡层焊条宜选择 25%Cr-13%Ni 型或 25%Cr-20%Ni 型。

b. 对覆层含钼的不锈钢复合钢，应采用 25%Cr-13%Ni-Mo 型焊条。

c. 常用不锈复合钢同种覆层材质过渡层焊接材料可按表 9-27 选用。

d. 常用不锈复合钢异种覆层材质过渡层焊接材料可按表 9-28 选用。

对于大厚度的不锈复合钢板的焊接构件，其刚度特别大，可选用纯镍焊条作为过渡层的焊接材料。

② 基层的焊接材料选用与基层碳钢（或低合金结构钢）单独焊接时相同的焊接材料，并以同样的焊接工艺进行施焊。基层施焊前原则上不进行预热，焊后不进行消除应力热处理。但是，对于厚度大、刚度大且基层为低合金结构钢的焊接构件，仍要进行预热，焊后仍需要进行整体或局部回火热处理来消除焊接残余应力。回火热处理温度不宜过高，一般控制在 400℃，以免影响覆层不锈钢的耐蚀性能。

③ 覆层焊接材料的选用。原则上与单独焊接不锈钢时的焊接材料相同，焊接工艺也相同。

表 9-26～表 9-28 介绍了不锈复合钢板的焊接方法及所选用的焊接材料。需要指出的是：不一定都要按表上所列的同一种焊接方法对不锈复合钢板的基层、过渡层和覆层进行施焊，可以根据实际情况灵活选用焊接方法和焊接材料。

表 9-26 常用不锈钢复合钢基层焊接材料[11,12]

基层材质	焊条电弧焊		埋弧焊		钨极气体保护焊		熔化极气体保护焊	
	焊条型号	焊条牌号	焊丝钢号	焊剂牌号	焊丝型号	保护气体	焊丝钢号	保护气体
Q235A	E4303	J422	H08A H08MnA	HJ431	ER50-4	Ar	H08Mn2Si	CO_2
Q235B、Q235C 20、Q245R	E4303、E4315、E4316	J427	H08A H08MnA	HJ431 SJ101	ER50-4	Ar	H10Mn2 H08Mn2SiA	CO_2
Q345、Q345R	E5003、E5015 E5015-G、E5016	J507、J506 J507RH	H10Mn2 H10MnSi	HJ431 SJ101	ER50-4	Ar	ER49-1 ER50-6	CO_2
Q390、Q420	E5003、E5015 E5016、E5510-G E5515-G、E5516-G	J502、J507 J506、J555G J557、J556	H08MnA、H10Mn2 H10MnSi、H08Mn2SiA H08Mn2MoA	HJ431、HJ430 HJ350、SJ101 SJ301、SJ501	H08Mn2SiA H08Mn2MoA H10MnSi	Ar	H08Mn2SiA H08Mn2MoA H10MnSi	Ar
13MnNiMoR	E6016-D1、E6015-D1	J606、J607	H08Mn2MoA	HJ350、SJ101	H08Mn2MoA	Ar	H08Mn2MoA	Ar
12CrMo	E5515-B1	R207	H13CrMoA	HJ350	H08CrMoA	Ar	ER55-B2	CO_2
14Cr1Mo、14Cr1MoR	E5515-B2	R307	—	—	—	—	—	—
15CrMo 15CrMoR	E5515-B2	R307	H13CrMoA H08CrMoA	HJ350 SJ101	H08CrMoA	Ar	ER55-B2	CO_2

表 9-27　同种覆层材质过渡层及覆层焊接材料[11,13]

覆层材质	过渡层焊接			覆层焊接				
	焊条型号	焊条牌号	氩弧焊丝	焊条型号	焊条牌号	埋弧焊丝钢号	埋弧焊剂牌号	氩弧焊丝
06Cr19Ni10	E309-16、E309-15 E309L-16、E310-16 E310-15	A302、A307 A062、A402 A407	H1Cr24Ni13 H0Cr26Ni21 H1Cr26Ni21 H1Cr24Ni13Mo2	E308-16 E308-15	A102 A107	H08Cr21Ni10	HJ260 SJ601	H0Cr21Ni10
12Cr18Ni9	E309-16、E309-15 E310-16、E310-15	A302、A307 A402、A407	H1Cr24Ni13 H0Cr26Ni21 H1Cr26Ni21 H1Cr24Ni13Mo2	E308-16 E308-15	A102 A107	—	—	H0Cr21Ni10
022Cr19Ni10	E309L-16	A062		E308L-16	A002	H03Cr21Ni10	HJ260 SJ601	H00Cr21Ni10
06Cr18Ni11Ti	E309-16、E309-15 E309L-16、E310-16 E310-15	A302、A307 A062、A402 A407		E347-16 E347-15	A132 A137	H08Cr19Ni10Ti H08Cr20Ni10Nb	HJ260 SJ601	H0Cr20Ni10Ti H0Cr20Ni10Nb
06Cr17Ni12Mo2	E309Mo-16 E309MoL-16 E309Mo-15	A312 A042	H1Cr24Ni13Mo2	E316-16	A202	H08Cr19Ni12Mo2	HJ260 SJ601	H0Cr19Ni12Mo2
06Cr17Ni12Mo2Ti	E309Mo-15 E309Mo -16	A317 A312	H1Cr24Ni13Mo2	E318-16	A212	—	—	H0Cr19Ni12Mo2
06Cr19Ni13Mo3	E309Mo-15 E309Mo -16	A317 A312	H1Cr24Ni13Mo2	E317-16	—	—	—	H0Cr20Ni14Mo3

续表

覆层材质	过渡层焊接			覆层焊接				
	焊条型号	焊条牌号	氩弧焊丝	焊条型号	焊条牌号	埋弧焊丝钢号	埋弧焊剂牌号	氩弧焊丝
022Cr17Ni12Mo2	E309MoL -16 E309Mo-15 E309Mo -16	A042 A317 A312	H1Cr24Ni13Mo2	E316L-16	A022	H03Cr19Ni12Mo2	HJ260 SJ601	H00Cr19Ni12Mo2
022Cr19Ni13Mo3	E309Mo-15 E309Mo -16	A317 A312	H1Cr24Ni13Mo2	E317L-16	—	—	—	—
06Cr13Al	E309-16、E309-15 E310-16、E310-15 ENiCrFe-3	A302、A307 A402、A407 —	H1Cr24Ni13 H0Cr26Ni21 H1Cr26Ni21 H1Cr24Ni13Mo2	E309-16 E308-16 ENiCrFe-3 E308-15	A302 A102 — A137	—	—	—
	E430-16 E430-15	G202 G307		E430-16 E430-15	G302 G307	—	—	—
06Cr13	E309-16、E309-15 E310-16、E310-15 ENiCrFe-3	A302、A307 A402、A407 —	H1Cr24Ni13 H0Cr26Ni21 H1Cr26Ni21 H1Cr24Ni13Mo2	E309-16 E308-16 ENiCrFe-3 E308-15	A302 A102 — A137	—	—	—
	E430-16 E430-15	G202 G307		E410-16 E410-15	G202 G207	—	—	—
2205①	E2209-17②	—	—	E2209-17②	—	ER2209②	—	—

① 2205 表示双相不锈钢的合金成分，含铬量约 22%、含镍量约 5%。

② E2209-17、ER2209 的熔敷金属含 N0.08%～0.20%。

表 9-28 异种覆层材质过渡层及覆层焊接材料[11]

覆层材质		过渡层焊接		覆层焊接			
		焊条型号	焊条牌号	焊条型号	焊条牌号	焊丝钢号	焊剂牌号
06Cr19Ni10	022Cr19Ni10 06Cr18Ni11Ti 06Cr17Ni12Mo2 022Cr17Ni12Mo2	E309-16 E309-15 E309L-16	A302 A307 A062	E308-16 E308-15	A102 A107	H08Cr21Ni10	HJ260 HJ601

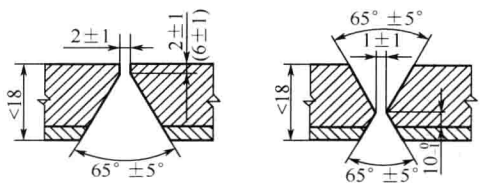
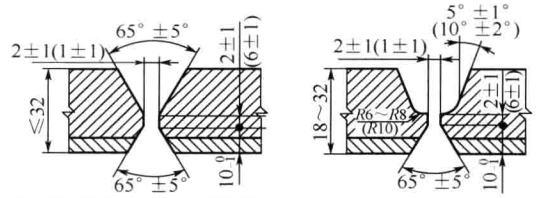
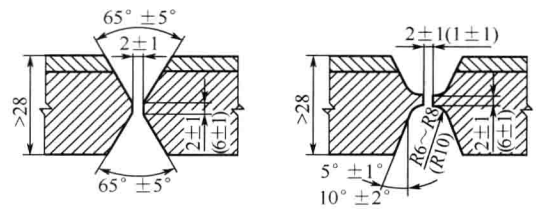
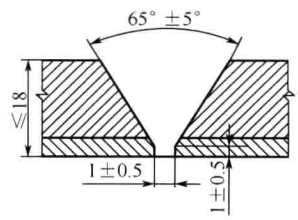
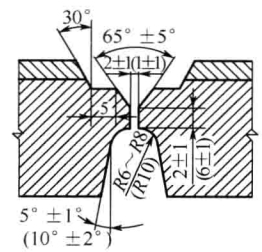
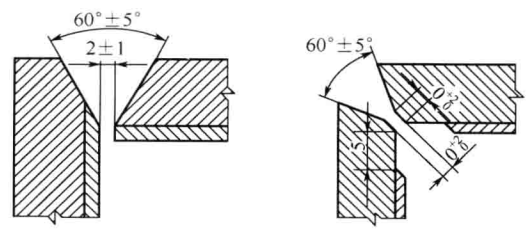
续表

覆层材质		过渡层焊接		覆层焊接			
		焊条型号	焊条牌号	焊条型号	焊条牌号	焊丝钢号	焊剂牌号
022Cr19Ni10	06Cr18Ni11Ti	E309L-16	A062	E308L-16 E347-16 E347-15	A002 A132 A137	H03Cr21Ni10 H08Cr19Ni10Ti H08Cr20Ni10Nb	HJ260 SJ601
	06Cr17Ni12Mo2	E309L-16 E309MoL-16 E309Mo-16	A062 A042 A312	E316-16 E308L-16	A202 A002	H08Cr19Ni10Ti H08Cr20Ni10Nb H08Cr19Ni12Mo2	HJ260 SJ601
	022Cr17Ni12Mo2	E309L-16 E309MoL-16	A062 A042	E308L-16 E316L-16	A002、A022	H03Cr21Ni10 H03Cr19Ni12Mo2	HJ260 SJ601
06Cr18Ni11Ti	06Cr17Ni12Mo2	E309L-16 E309MoL-16	A062 A042	E347-16 E347-15 E316-16	A132 A137、A202	H08Cr19Ni10Ti H08Cr19Ni12Mo2 H08Cr20Ni10Nb	HJ260 SJ601
	022Cr17Ni12Mo2	E309L-16 E309MoL-16	A062 A042	E347-16 E308L-16	A132 A002	H08Cr19Ni10Ti H08Cr19Ni12Mo2	HJ260 SJ601
06Cr17Ni12Mo2	022Cr17Ni12Mo2	E309MoL-16、 E309Mo-16	A042 A312	E316-16 E316L-16	A202 A022	H08Cr19Ni12Mo2 H03Cr19Ni12Mo2	HJ260 SJ601
06Cr13 06Cr13Al	022Cr19Ni10 06Cr17Ni12Mo2 022Cr17Ni12Mo2 06Cr19Ni10 06Cr18Ni11Ti	E309-16 E309-15 E309L-16	A302 A307 A062	E309-16 E309-15 E308-16 E308-15	A302 A307 A102、A107	H08Cr21Ni10	HJ260 SJ601

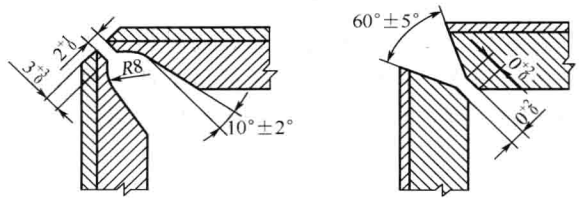
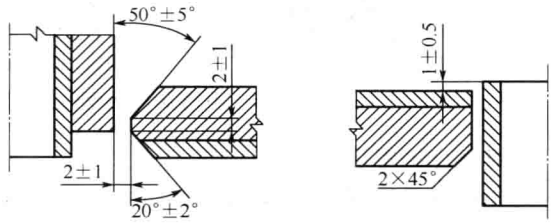
（3）坡口形式

坡口形式见表 9-29。外坡口用的比较普遍，但是根据焊接构件的焊接接头位置，有时也需要开成内坡口。对于大厚度不锈复合钢板要开成 X 形坡口，使内外焊缝金属体积基本相当，可减少焊接变形。

表 9-29 不锈复合钢的坡口形式和尺寸[12]

材料厚度与焊接条件	坡口尺寸
母材厚度 <18mm	
母材厚度 18～32mm	
母材厚度 >28mm	
仅能单面施焊	
复合比特别大或预先开坡口有困难时	
不锈钢在内侧	

续表

材料厚度与焊接条件	坡口尺寸
不锈钢在外侧	
不锈钢复合钢板与接管	

（4）装配与定位焊

不锈复合钢板在组装以前，须将待焊处及边缘约 20mm 范围内（包括坡口侧面）清理干净，不得有水、油污、锈蚀和其他污物。厚度相同（基层和覆层厚度均相同）的不锈钢复合钢板焊件的装配，应以覆层表面为基准，见图 9-10，其错边量不应大于覆层厚度的 1/2，且不应大于 2mm[13,14]。厚度不同（或复层厚度不同，或基层厚度不同，或两者均不同）的不锈钢复合钢板焊件的装配基准，按设计图样的规定执行[14]。如果覆层之间装配时错边过大，会产生附加弯曲应力，降低使用寿命；同时基层根部的焊缝有可能熔化部分不锈钢，使基层根部的合金元素增加，导致焊缝熔合区脆化。

定位焊一定要在基层面上进行，所选用的焊接材料与焊接基层时的焊接材料相同，不允许用覆层的焊接材料在基层上进行定位焊。定位焊的焊缝长度应控制在 10～30mm 范围内。值得注意的是，不允许在覆层上进行定位焊，以保证覆层的焊缝质量。

（5）焊接顺序

不锈复合钢板对接焊缝的焊接顺序如图 9-11 所示。先将开好坡口的不锈复合钢板装配好，首先焊接基层碳钢。基层焊接完毕后要对其焊缝进行检验（包括焊缝表面和焊缝内部质量），确认焊接接头质量（特别是焊缝内部质量）达到合格标准后，才能做焊接隔离层的准备工作。在覆层不锈钢板一侧进行铲削，并将待焊根部制成圆弧形。为了防止未焊透，铲削要进行到暴露出基层碳钢为止，并打磨干净。然后焊接隔离层，其焊缝一定要熔化覆层不锈钢板一定厚度，才能起到隔离作用。隔离层焊缝（包括焊缝内部质量）达到合格标准后，最后在隔离层焊缝上焊接不锈钢覆层。焊接不锈钢覆层时，在不影响焊接接头质量的前提下，可加快覆层焊接的冷却速度，避免覆层在 600～1000℃停留时间过长而影响其耐蚀性能。

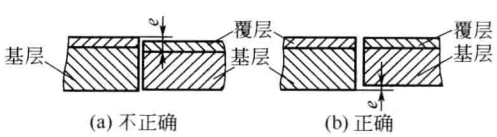


图 9-10　不锈复合钢板的组对

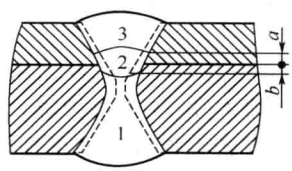
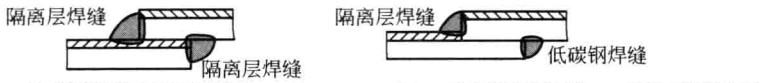


图 9-11　不锈复合钢板对接焊缝的焊接顺序

1—基层焊缝；2—过渡层焊缝；3—覆层焊缝

过渡焊缝在不锈钢复合钢对接接头中的位置及焊接顺序如图 9-11 所示。推荐 $a=0.5\sim1.5\text{mm}$，$b=1.5\sim2.5\text{mm}$[15]。

不锈复合钢板的搭接接头和角接接头形式如图 9-12 和图 9-13 所示。在待焊接区中碳钢和不锈钢共存部位，要选用隔离层的焊接材料。待焊处出现都是碳钢时，可以按基层所选用的焊接材料进行施焊；同样，待焊区都是不锈钢材料时，理应选用覆层的焊接材料，但是考虑到焊接熔池的深度，可能将基层熔化，此时第一层焊缝仍要选用隔离层的焊接材料，切切不可忽视。

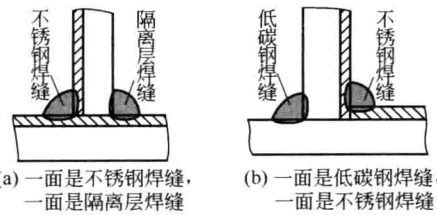


(a) 搭接焊缝为隔离层焊缝　　(b) 一面是隔离层焊缝，一面是低碳钢焊缝

图 9-12　不锈复合钢板的搭接接头形式

(6) 不锈钢复合钢覆层修复

不锈钢复合钢覆层修复，焊接顺序如图 9-14 所示，去掉覆层后将基层表面去掉 1.0～2.0mm 厚，然后堆焊过渡层及覆层，焊后修磨堆焊表面，修复堆焊层上部的化学成分应在覆层钢号化学成分范围之内或应满足使用要求。



(a) 一面是不锈钢焊缝，一面是隔离层焊缝　　(b) 一面是低碳钢焊缝，一面是不锈钢焊缝

图 9-13　不锈复合钢板的角接接头形式

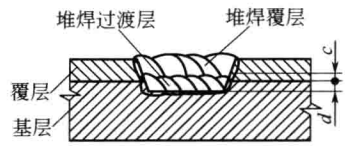


图 9-14　覆层焊接修复示意图

$c=0.5\sim1.0\text{mm}$；$d=1.0\sim2.0\text{mm}$

(7) 注意事项

① 焊前若发现不锈复合钢板有分层情况，不允许进行焊接。如果在焊接坡口边缘有分层，会导致钢板覆层和基层之间焊合不良。此时一定要将不锈复合钢板全部进行无损检测，如判断其分层范围很小，可以彻底铲除分层进行焊补（即堆焊），待修复后才能进行正式施焊。

② 基层一侧和覆层一侧的待焊处，应分别使用专用砂轮和钢丝刷等工具，基层侧必须使用碳钢钢丝刷，而覆层侧必须使用不锈钢钢丝刷。

③ 对覆层、基层和隔离层所用的三种焊接材料分别作出明显标记，严格区分，防止混淆。绝对禁止用焊接基层的焊接材料焊接隔离层或焊接覆层；同样，也要防止焊接覆层的焊接材料在焊接基层或隔离层的焊缝上。

④ 过渡焊缝应同时熔合基层焊缝、基层母材和覆层母材，且应盖满基层焊缝和基层母材。

⑤ 基层的根部焊缝通常采用焊条电弧焊进行施焊，第二层以上的焊缝在可能的情况下选用埋弧焊或 CO_2 气体保护焊，以提高生产效率，减轻工人劳动强度。在大多数的情况下隔离层采用焊条电弧焊，在保证焊透的情况下，为了减少合金元素的稀释，希望熔合比小一些，尽可能采用小的焊接电流、快速焊、焊条不允许做横向摆动的焊接，覆层被熔化的宽度和深度尽量保持均匀一致。焊接覆层时，尽量选用低碳或超低碳的不锈钢焊接材料，目的是提高焊缝金属耐蚀性能。焊接时应选用小的热输入，使其在 600～1000℃停留时间越短越

好，以提高与腐蚀介质接触时有良好的耐晶间腐蚀性能。

⑥ 覆层不锈钢焊接后，仍要进行酸洗和钝化处理，或者在覆层焊接接头的局部区域进行酸洗去除褐色氧化膜的化学处理。

9.9.4　焊缝金属的晶间腐蚀试验

不锈复合钢板制成的设备，其覆层不锈钢焊缝侧肯定要接触腐蚀性介质。为了评定覆层不锈钢焊缝耐蚀性能，需要对焊接接头进行晶间腐蚀的检验，其检验方法应根据覆层材料成分和相应的技术标准来确定，通常按 GB/T 4334—2000 进行判定。

9.9.5　焊后热处理

对于大厚度不锈复合钢板的焊接构件，焊后热处理可以消除焊接残余应力。但是选择热处理温度不仅应考虑覆层不锈钢的耐蚀性，而且还要考虑到不锈复合钢板交界面上组织的不均匀性。随着热处理温度的提高，在交界面上碳元素从碳钢一侧向不锈钢一侧的扩散速度会加快，热处理时间愈长，碳元素的迁移愈严重。其结果是在碳钢一侧形成铁素体的脱碳层，强度会降低；而在不锈钢一侧因渗碳而变硬脆，造成冲击韧度下降，成为焊接接头失效的隐患。

不锈钢复合钢应尽量避免焊后热处理。当需要进行焊后热处理时，应避免复层母材和焊接接头中铬碳化物析出和形成 σ 相。焊后热处理保温时间应以复合钢总厚度来确定[15]。需要热处理的不锈复合钢板的焊接构件，应当在基层焊接完毕，经检测焊缝内、外部质量均合格后进行热处理，且温度不宜超过 400℃，在此温度下保温时间可略微延长些。用此温度进行正确的焊后热处理，可使残余应力降低 40%左右，同时不会影响覆层不锈钢的耐蚀性能，覆层与基层之间的碳元素扩散也不易发生。热处理结束后方可焊接隔离层和覆层不锈钢板[13]。覆层焊接完毕后，不必进行任何热处理。热处理注意事项如下所述。

① 覆层为 06Cr13 的不锈钢复合钢制压力容器，当使用奥氏体不锈钢焊材焊接覆层和基层材料不要求焊后热处理时，可免作焊后热处理。否则应按覆层材料要求进行焊后热处理。

② 覆层不是 06Cr13 的不锈钢复合钢制压力容器焊后热处理按基层材料要求进行。覆层为堆焊金属的不锈钢复合钢制压力容器如果基层需要焊后热处理，则应在堆焊覆层后再进行。

③ 对耐晶间腐蚀要求较高的设备，如果基层需要焊后热处理，则宜在热处理后再焊覆层的盖面层焊缝。

9.9.6　工程实例

(1) 00Cr18Ni5Mo3Si2＋Q235 不锈复合钢板的焊接[1]

① 焊接特性。覆层双相不锈钢 00Cr18Ni5Mo3Si2 钢板具有优异的耐应力腐蚀性能，而基层碳钢 Q235 钢板具有一定的结构强度，故制成的炼油工业塔体有较好的使用性能和经济效益。双相不锈复合钢板的化学成分见表 9-30。

表 9-30　双相不锈复合钢板的化学成分（质量分数）[1]　　%

复合钢板材料	C	Si	Mn	Cr	Ni
基层 Q235 钢	0.170	0.23	0.55	—	—
覆层 00Cr18Ni5Mo3Si2 钢	0.023	1.68	1.24	18.50	4.89
复合钢板材料	Mo	S	P	Al	N
基层 Q235 钢	—	0.040	0.019	—	—
覆层 00Cr18Ni5Mo3Si2 钢	1.69	0.009	0.013	0.013	0.006

注：00Cr18Ni5Mo3Si2 新牌号为 022Cr19Ni5Mo3Si2N。

这种双相不锈复合钢板，如果仅在覆层和基层上选用各自与母材相同的焊接材料进行施焊，同样会在双相不锈钢和碳钢的过渡层中产生硬脆的马氏体组织，在熔合区出现增碳层和脱碳层，有可能引起焊缝交界处产生裂纹。

为了克服这种双相不锈复合钢板焊接时出现的裂纹，与其他不锈复合钢板焊接一样，要建立一个隔离层避免基层与覆层直接熔合在一起，以消除马氏体组织。为此应选用一种隔离层焊接材料。

② 焊接工艺。

a. 焊接方法。选用焊条电弧焊。

b. 焊条选用。基层选用 E4315 型焊条，可达到与基层等强度。隔离层和覆层所选用焊条的熔敷金属的化学成分见表 9-31。它们均具有良好的抗裂性能和焊接性。用 A302 焊条进行隔离层焊接，覆层用 A022Si 焊条焊接，其焊接接头的力学性能试验结果见表 9-32，焊接接头强度与母材相当，试样全部断在母材上。

表 9-31 隔离层和覆层所选用焊条的熔敷金属的化学成分[1]

焊条牌号	熔敷金属的化学成分(质量分数)/%								所焊部位
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	S	P	
A022Si 3RS-61	0.033	1.16	0.50	21.21	10.09	2.77	0.004	0.010	覆层
A302	0.050	0.60	1.68	22.70	10.09	—	0.010	0.018	隔离层
A312L P5	0.035	0.54	1.51	23.23	14.70	1.90	0.008	0.022	隔离层 覆层

表 9-32 双相不锈钢复合钢板焊接接头力学性能[1]

σ_b /MPa	τ_b /MPa	a_k/(J/cm²)		扭转角 /(°)	弯曲角/℃		
		焊缝	熔合线		内弯	外弯	侧弯
510～530	205～420	104	80～90	360 完好	—	180	—

对于双相不锈复合钢板焊接接头进行耐蚀性检查，主要考核其耐孔蚀、耐应力腐蚀和抗晶间腐蚀的能力。试样制取时，一定要将碳钢部分全部去除并磨光，试验结果见表 9-33。从表中可以看出，选用 A312L 和 A022Si 焊条作为覆层的焊接材料完全能满足产品的基本要求。单用 A312L（或瑞典 P5）焊条同时进行隔离层和覆层焊接也是可以的，但进口焊条价格偏高。

表 9-33 双相不锈复合钢板焊接接头耐蚀性能试验[1]

焊条牌号	孔蚀腐蚀率 /[g/(m²·h)]	应力腐蚀时间/h				晶间腐蚀	
		20	40	186	426	焊缝	热影响区
3RS-61	2.08	未裂	未裂	未裂	未裂	无	有
A022Si	2.08					—	—
A312L(P5)	2.29					无	有

c. 坡口形式。焊条电弧焊采用双面焊为主，对接纵焊缝的坡口形式和尺寸见图 9-15。图 9-16 为交叉焊缝的坡口形式及焊接顺序示意图，通常是指筒体的纵焊缝与封头的环缝焊接时采用这种形式。此时筒体纵焊缝的隔离层的厚度应视为覆层厚度来处理，才能避免交叉

焊缝产生裂纹。

d. 装配和焊接顺序。要以双相不锈钢覆层表面为装配基准面，最大错边量应小于 0.2mm，装配间隙应不大于 0.5mm。焊接顺序见图 9-15 和图 9-16。首先用 E4315 型焊条焊接基层，基层焊缝内、外部质量合格后，彻底清根打磨干净后，再焊隔离层焊缝，最后焊接覆层焊缝。

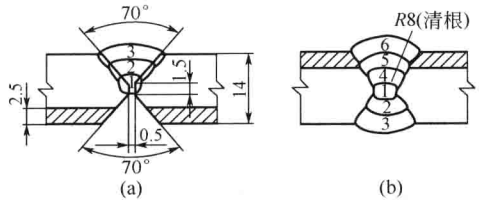


图 9-15　复合钢板对接纵焊缝坡口尺寸和焊接顺序示意图

1、2、3—E4315 焊缝；4、5—A302 焊缝；6—耐蚀层焊缝

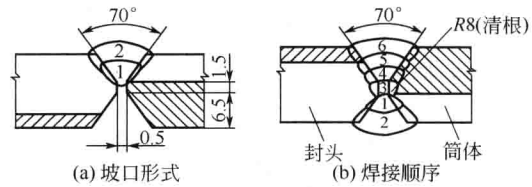


图 9-16　交叉焊缝坡口形式及焊接顺序示意图

e. 焊接工艺要点。无论基层、隔离层和覆层的焊条均选用直径 ϕ3.2mm，采用小的热输入，即在保证焊接质量的前提下，用小的焊接电流、快的焊接速度进行施焊。施焊过程中不允许焊条做横向摆动。

（2）双相不锈复合钢板的埋弧焊[1,15]

在我国生产的 4DM-PKM 加压气化炉，炉体长期处于高温高压之下且在腐蚀介质中工作，选用 H11/X2CrNiMoN22-5-3（产地：德国）双相不锈复合钢板进行制作。覆层材料为双相不锈钢 X2CrNiMoN22-5-3，作为耐高温耐腐蚀的钢材；基层选用碳钢 H11，用来满足结构强度和刚度之用。这样既保证了产品的使用寿命，又提高了材料的使用率。其化学成分和力学性能见表 9-34。

表 9-34　H11/X2CrNiMoN22-5-3 化学成分及力学性能

钢号	化学成分(质量分数)/%					
	C	Si	Mn	S	P	Cr
H11	≤0.20	≤0.35	0.50～1.30	0.030	0.035	≤0.25
X2CrNiMoN22-5-3	0.035	1.05	2.04	0.025	0.04	20.8～23.2

钢号	化学成分(质量分数/%)			力学性能			
	Ni	Mo	N	σ_b/MPa	σ_s/MPa	δ_5/%	A_{kV}/J
H11	0.30	≤0.1	—	410～530	255	22	30(0℃)
X2CrNiMoN22-5-3	4.40～6.60	2.4～3.6	0.07～0.21	680 ～880	450	25	104(20℃)

① 焊接工艺。采用埋弧焊，为了满足产品性能要求，需要保持焊缝金属表面相比例平衡，其铁素体的体积分数为 35%～40%。选用德国焊丝 GR1N0X23-8-3L 配用 LW410 焊剂作为焊接过渡层和覆层的焊接材料；基层的焊接材料为 H10Mn4 焊丝配用 Pie18 焊剂。这两种牌号焊丝的化学成分见表 9-35。

表 9-35　焊丝的化学成分

焊丝牌号	焊丝直径/mm	化学成分(质量分数)/%				
		C	Si	Mn	S	P
GR1N0X23-8-3L	3	0.04	0.16	1.75	0.006	0.012
H10Mn4	4	0.08	0.14	1.16	0.022	0.020

续表

焊丝牌号	焊丝直径/mm	化学成分(质量分数)/%			
		Cr	Ni	Mo	N
GR1N0X23-8-3L	3	23.19	9.49	3.11	0.056
H10Mn4	4	0.09	0.07	—	—

a. 坡口形式。开不对称 X 形坡口，其形式与尺寸见图 9-17。

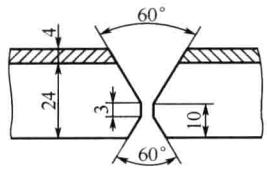


图 9-17 焊接坡口形式与尺寸

b. 清理。焊件待焊处 20mm（包括坡口面）表面要将水、油污、锈蚀等脏物清理干净，特别是覆层面要防止焊接过程中飞溅、焊渣、划伤和烧伤。焊丝表面同样要除水分、油污和杂物。

c. 焊接程序。先焊覆层一侧坡口的基层焊缝，然后从基层背面清根，进行焊接并填满背面坡口。检查焊缝内、外部质量，确保焊接质量达到技术条件后，再焊接过渡层和覆层的焊缝。

d. 焊接参数的选择。过渡层焊缝必须考虑基层对它的稀释作用，防止在过渡层焊缝熔合线附近出现大量的马氏体组织和硬化相，希望采用小的热输入。这是因为，大的焊接电流和慢的焊接速度均促使熔深加大，而导致稀释率提高，不利于过渡层焊缝的质量。有关 H11/X2CrNiMoN22-5-3 焊接参数见表 9-36。

表 9-36 H11/X2CrNiMoN22-5-3 钢板焊接参数

焊接部位	焊接材料	焊丝直径/mm	焊接电流/A	电弧电压/V	焊接速度/(m/min)
基层	H10Mn4 Pie18	4	500～550	32～34	50～55
过渡层	GR1NOX23.8.3L LW410	3	350	32	—
覆层	GR1NOX23.8.3L LW410	3	400	32～34	25～35

e. 焊后检查。焊接过程中配备了一对产品焊接试板，试板的材料成分、规格与产品相同且与产品同时施焊，其焊缝金属化学成分见表 9-37。

表 9-37 焊缝金属化学成分（质量分数） %

焊缝部位	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N
基层	0.075	0.47	1.08	0.019	0.016	—	—	—	—
覆层	0.046	—	—	—	—	19.83	8.10	2.77	0.08

② 产品焊接试板其他项目检查结果。

a. 覆层焊缝表面进行磁粉检测。铁素体的体积分数为 35%～40%，达到了设计相比例的数值。

b. 焊缝金属的金相组织检查。覆层组织为奥氏体网状分布，铁素体呈条状，铁素体的体积分数通过金相分割法测出数值为 40%；焊缝熔合区的显微组织为奥氏体基体上分布铁素体和析出氮化物、氮碳化合物；过渡层焊缝组织为奥氏体加铁素体的双相组织；过渡层焊缝与基层和基层焊缝的熔合线组织为奥氏体加隐针状马氏体；基层焊缝为铁素体加少量珠光体组织。

c. 基层焊接接头进行力学性能试验。σ_s346MPa，σ_b 484MPa，$\delta_5$22.1%，ψ63.1%；冲

击吸收功 A_{kV} 焊缝金属为 71.13J，熔合区 161J，热影响区 144.1J。

d. 覆层焊接接头按 GB/T 4334.5—2000 进行晶间腐蚀检查。试件尺寸为 80mm×20mm×3mm，试件分焊态和焊后 650℃×2h 敏化处理，试验结果均为合格，说明覆层焊接接头耐晶间腐蚀性能良好。

从产品焊接试件的焊接接头测试结果表明，有关主要技术指标完全满足了产品性能的要求。

(3) SPV36N-SUS410S 复合不锈钢钢板的焊接[16]

注：SPV36N 为日本钢，相当于我国的 Q345R 钢，SUS410S 为日本钢，相当于我国的 06Cr13 钢。

① 焊接方法。基层选用焊条电弧焊和埋弧焊，隔离层和覆层采用不锈钢药芯焊丝 FCWE309T（日本）CO_2 气体保护焊。

② 焊接材料的选择。基层的焊接方法有两种：焊条电弧焊选用 J507（E5515 型）焊条，埋弧焊选用 H10MnSi（ER50 型）焊丝和 HJ431 焊剂。隔离层和覆层均为药芯焊丝 FCWE309T，配用不同气体的气体保护和 E309 型焊条电弧焊，它们在熔敷金属化学成分方面的比较见表 9-38。从表中可以看出，药芯焊丝无论配用 CO_2 气体还是氩气作为保护气体，其熔敷金属的化学成分相当；与 E309 型焊条相比，熔敷金属的化学成分也相当，且碳含量还低于 E309 型焊条；使用价廉的 CO_2 气体保护焊也不会使焊缝金属增碳。测得焊缝金属组织为奥氏体和体积分数为 7%～10%的铁素体，这有利于焊接接头抗裂性能和耐腐蚀性能。

表 9-38　FCWE309T 与 E309 熔敷金属化学成分（质量分数）　%

焊接方法	焊接材料	熔敷金属化学成分				
		C	Cr	Ni	S	P
氩弧焊	FCWE309T	0.080	25.31	12.36	0.011	0.018
CO_2 焊		0.085	25.14	12.34	0.011	0.017
焊条电弧焊	E309	0.15	22.0～25.0	12.0～14.0	0.030	0.040

③ 坡口形式。坡口形式如图 9-18 所示，这种坡口形式比较特殊，为阶梯式坡口。它的优点是，不仅便于焊工在操作时控制焊缝厚度，降低了根部焊缝的熔合比，而且更重要的是避免了用常规坡口形式所带来装配不准确的缺点。坡口在刨边机上刨成，其尺寸见图 9-17。在组装前，要将坡口内侧和待焊面两侧各 50mm 范围内，用丙酮清洗干净，不得有油污和锈蚀。

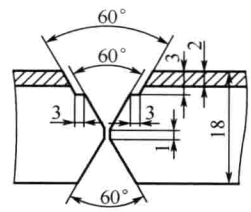


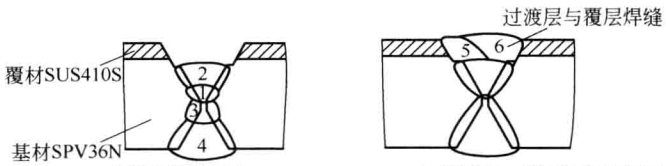
图 9-18　坡口形式和尺寸

④ 焊接。

a. 装配时以覆层 SUS410S 钢板为基准，错边量≤0.5mm；定位焊一定要在基层上进行，所用焊接材料与焊接正式施焊用的焊接材料相同，定位焊缝长度为 30～50mm。

b. 焊接顺序。先焊基材焊缝，先用直径为 ϕ3.2mm 的 J507（E5015）焊条进行焊条电弧焊，见图 9-19(a) 中 1 的焊缝；然后用直径 ϕ4mm 焊条进行填充焊［图 9-19(a) 中 2 的焊缝］。此焊缝表面应略高于坡口平台。基层外侧焊缝采用埋弧焊，见图 9-19(a) 中 3、4 焊缝。基层焊接完毕进行 X 射线检测，合格后方可焊接隔离层和覆层。隔离层和覆层焊接以前，先修磨覆层侧的基层焊缝表面，使其与平台基本平齐，如图 9-19(b)，然后用 FCWE309T 药芯焊丝气体保护焊施焊，焊丝直径为 ϕ1.2mm，焊接顺序见图 9-19(b)。

c. 焊接参数。基层、隔离层和覆层的焊接参数见表 9-39。



(a) 基层的焊接顺序　　(b) 隔离层、覆层的焊接顺序

图 9-19　施焊顺序

d. 隔离层和覆层焊接操作要点。焊枪做直线运动，尽量不做横向摆动；采用左向焊法，便于焊工观察熔池前端的坡口，易控制焊缝成形；阶梯状坡口底部宽为 14～16mm，需采用单层双道焊，第一道焊缝不宜过宽，不超过底宽的 2/3，一般控制在 1/3～2/3 之间，否则第二道焊缝成为窄而深的焊道，易造成隔离层焊缝的未熔合和夹渣等缺陷；施焊时，若接头引弧处存在缺陷，应打磨或剔除后再引弧，否则影响接头性能；熄弧后，有时熔渣附着在焊丝端头形成熔球，在此情况下就不能顺利打弧，必须剪去；熄弧后重新引弧的位置，应在熔池前端 15～30mm 处开始，电弧引燃后快速送向弧坑处，填满弧坑后才能继续向前施焊。

表 9-39　焊接参数

焊接顺序	焊接方法	焊接材料		焊接参数
		牌号	规格/mm	
1、2	焊条电弧焊	J507	ϕ3.2 ϕ4.0	I=90～170A U=22～24V
3、4	埋弧焊	H10MnSi HJ431	ϕ5.0	I=500～700A U=34～38V v=42～52cm/min
5、6	药芯焊丝 CO_2 焊	FCWE309T	ϕ1.2	I=160～180A U=27～29V v=27～30mm/min 焊丝伸出长度 13～18mm CO_2 气流量 Q=13～ 14L/min

参 考 文 献

[1] 张其枢，堵耀庭．不锈钢焊接．北京：机械工业出版社，2000.
[2] 机械工业技师考评培训教材编审委员会．焊工技师培训教材．北京：机械工业出版社，2001.
[3] 杜国华主编．实用工程材料焊接手册．北京：机械工业出版社，2004.
[4] 周振丰主编．金属熔焊原理及工艺（下册）．北京：机械工艺出版社，1981.
[5] GB/T 983—2012. 不锈钢焊条．
[6] 叶玉芬，余春芝．0Cr18Ni10Ti 与 16Mn 锻厚板的焊接．焊接，1997，(4).
[7] 章锦高．3Cr13 与 1Cr18Ni9Ti 异种钢高压管焊接．焊接，1993，(5).
[8] GB/T 8165—2008. 不锈钢复合钢板和钢带．
[9] NB/T 47002.1—2009. 压力容器用爆炸焊接复合板　第 1 部分：不锈钢-钢复合板．
[10] YB/T 4282—2012. 压力容器用热轧不锈钢复合钢板．
[11] SH/T 3527—2009. 石油化工不锈钢复合钢焊接规程．
[12] NB/T 47015—2011（JB/T 4709）. 压力容器焊接规程．
[13] GB/T 13148—2008. 不锈钢复合钢板焊接技术要求．
[14] GB/T 150.4—2011. 压力容器 第 4 部分：制造、检验和验收．
[15] 高慧玲等．双相不锈复合钢板埋弧自动焊．焊接学报，1997，(1).
[16] 伍小龙．药芯焊丝电弧焊在不锈复合钢反应器制造中的应用．焊接，1996，(4).

第10章 不锈钢焊接质量控制

焊接产品的质量优劣，直接影响焊接产品的可靠使用，一旦焊接产品失效，轻者使生产不能正常运转，严重者会造成灾难性事故，后果不堪设想，所以对焊接质量的要求愈来愈高。在制造过程中必须控制全过程质量，才能满足产品质量的要求。制造过程中的质量控制与许多因素有关，可称是一个系统工程。下面就焊接系统影响产品质量的重要环节和关键点，叙述质量管理控制的方法。

10.1 焊工管理

焊工管理这一控制环节，包括培训考试管理、持证管理和焊工档案管理这三个控制点[1]。企业焊接责任工程师是焊工管理的第一责任人，焊接责任工程师应掌握焊工的基本情况，负责对焊接培训和持证焊工的监督管理，提高焊工素质，以保证产品焊接质量。确保所有焊工都要依据“焊工考试规则”进行基本知识与操作技能的培训和考试，取得与实际施焊的焊接方法、材料类别、焊件种类和焊接位置相对应的合格项目以后，才可从事相应的焊接工作。

10.1.1 焊工的培训与考试管理

（1）提高焊工素质的必要性

GB/T 12467.1—2009《金属材料熔焊质量要求 第1部分：质量要求相应等级的选择准则》、GB/T 12467.2—2009《金属材料熔焊质量要求 第2部分：完整质量要求》、GB/T 12467.3—2009《金属材料熔焊质量要求 第3部分：一般质量要求》、GB/T 12467.4—2009《金属材料熔焊质量要求 第4部分：基本质量要求》、GB/T 12468—1990《焊接质量保证 对企业的要求》、HG/T 2806—2009《奥氏体不锈钢压力容器制造管理细则》（以下简称HG/T 2806—2009）等标准均对焊工资格提出了要求。控制好焊接产品制造过程中的质量，人的因素起决定性作用，特别是焊工的素质极为重要。因为焊接产品中的每一条焊缝都是由焊工操作完成的，焊工的素质，在很大程度上决定了焊接产品的质量。这一点在焊条电弧焊时表现尤为突出。对于机械化焊接时，焊接操作机依然须由焊工操纵，要保证焊接过程正常施焊，仍需焊工在施焊过程中不断地调整焊接参数，才能获得优质的焊接接头，所以焊工的素质是第一位的。国内各有关部门制订的本行业焊工资格考试办法，足以说明焊工素质对焊接产品质量影响的重要性，对提高焊工素质的必要性。

（2）提高焊工素质的方法

企业只有重视人员的培训，搞好资格评定工作，运用各种激励措施，调动焊工的积极

性，才能不断提高人员素质，保证质量体系的有效运行。国内外实践经验表明，企业广大职工的文化素质、专业知识和技能、质量意识和质量管理知识水准等是保证质量的基本前提条件。否则，即使有了新材料、新设备和新技术，也仍然生产不出质量满意的产品。因此企业建立健全的质量体系的最根本任务还在于提高人员素质。

① 提高焊工素质须坚持对焊工定期培训，通过培训增长理论知识，提高操作技能，达到理论指导实践，再通过实践总结分析来提高理论水平，使焊工素质得到全面的提高。

② 对焊工焊绩进行统计考核，对现场施焊工艺纪律进行检验，针对焊绩较差的焊工制订出培训计划。

③ 焊工之间相互交流技艺也是提高焊工素质的有效方法之一。

(3) 焊工培训与考试的职责

① 企业的焊接责任工程师是焊工考试培训的主管负责人，焊接责任工程师应及时编制考试培训计划（包括考试日程安排、考试地点、考试项目、如企业有焊工考试委员会还应制定焊工考试指导书），焊工证到期前应提前安排培训和考试，避免超期上岗。

② 焊工的培训教师应掌握最新的知识和操作技能。

③ 焊工考试的目的是鉴定焊工按照评定合格的工艺焊出质量符合要求的焊缝的技能。焊工考试时所采用的焊接工艺应事先评定合格。

④ 所用的焊接设备应完好，仪表应正常，试件所用的钢材、焊接材料应符合标准，以免其他因素影响焊工技能鉴定。

⑤ 各企业应根据企业生产要求及焊工合格证有效期限制订焊工培训与考核计划。

(4) 申请压力容器压力管道考试的焊工应具备的基本条件

具有初中或初中以上文化程度或同等学历、身体健康、能独立完成焊接工作的，均可向焊工考试委员会提出培训和考试的申请，经批准后可参加培训和考试。

(5) 考试执行的标准

常见的焊工考试标准、规范如下。

DL/T 679—2012《焊工技术考核规程》

GB/T 15169—2003《钢熔化焊焊工技能评定》

GB/T 19805—2005《焊接操作工 技能评定》

TSG Z6002—2010《特种设备焊接操作人员考核细则》

上述标准、安全技术规范规定了焊工操作资格的考试方法和要求。从事特种设备焊接工作的焊工应按 TSG Z6002—2010《特种设备焊接操作人员考核细则》（以下简称为 TSG Z6002—2010，新考规与 2002 版《锅炉压力容器压力管道焊工考试规则》的主要变化见表 10-1）进行培训与考核，该考规明确规定焊工须经基本知识和操作技能考试合格后，才允许担任合格证范围内的特种设备产品焊接工作。从事一般钢结构件焊接的焊工应按 GB/T 15169—2003《钢熔化焊焊工技能评定》进行培训与考核。

(6) 考试内容

焊工考试包括基本知识和操作技能两方面，基本知识考试合格后方可参加操作技能考试。

(7) 焊接方法

不锈钢特种设备焊工考试常见的焊接方法见表 10-2。

改变焊接方法应分别考试，用手工钨极氩弧焊打底，焊条电弧焊填充，这样的项目既可按不同焊接方法单独考试，也可两种方法由同一焊工在同一试件上组合考试。

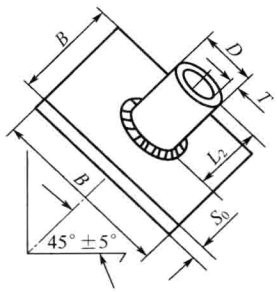
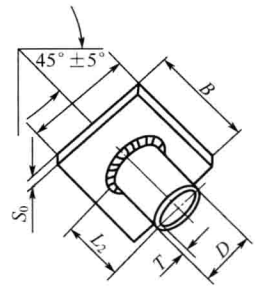
表 10-1　新旧焊考规则的主要区别

序号	2002 版《锅炉压力容器压力管道焊工考试规则》	TSG Z6002—2010《特种设备焊接操作人员考试细则》
1	适用范围：锅炉、压力容器（含气瓶，下同）、压力管道（第二条）	增加电梯、起重机械、客运索道、大型游乐设施、场（厂）内专用机动车辆（第二条）
2	应考焊缝：承压类设备的受压元件焊缝、与受压元件相焊的焊缝、受压元件母材表面堆焊；熔入焊缝内的定位焊缝（第三条）	增加机电类设备的主要受力结构（部）件焊缝，与主要受力结构（部）件相焊的焊缝；熔入焊缝内的定位焊缝（第三条）
3	基本知识考试采用笔试，焊工基本知识考试合格有效期为 6 个月（第九条）	基本知识考试采用计算机答题方法。焊工基本知识考试成绩有效期为 1 年（第十九条）
4	没有相关规定	报名参加考试的焊工，应当向考试机构提交以下资料（第十五条） a.《特种设备焊接操作人员考试申请表》（见附件 C，1 份） b. 居民身份证（复印件，1 份） c. 正面近期免冠照片（1 寸，2 张） d. 初中以上（含初中）毕业证书（复印件）或者同等学历证明（1 份） e. 医疗卫生机构出具的含有视力、色盲等内容的身体健康证明
5	焊工合格证（合格项目）有效期为 3 年 注：出版时焊工合格证（合格项目）有效期为 3 年，后按 70 号修订为 2 年。（第三十九条）……可办理免试（第二十四条）	《特种设备作业人员证》每四年复审一次。首次取得的合格项目在第一次复审时，需要重新进行考试；第二次以后（含第二次）复审时，可以在合格项目范围内抽考（第二十四条）
6	年龄超过 50 岁的焊工，其焊工合格项目有效期满后，如继续从事受监察设备的焊接工作，须重新考试，一般不得免考（第四十条）	年龄超过 55 岁的焊工，需要继续从事特种设备焊接作业，根据情况由发证机关决定是否需要重新考试（第二十九条）
7	没有相关规定	申请复审时，持证焊工应当提交以下资料（第二十六条） a.《特种设备焊接操作人员复审申请表》 b.《特种设备作业人员证》（原件） c.《特种设备焊工焊绩记录表》 d.《特种设备焊工考试基本情况表》 e. 焊接操作技能考试检验记录表 f. 医疗卫生机构出具的含有视力、色盲等内容的身体健康证明（原件）
8	中断受监察设备焊接工作六个月以上的，再从事受监察设备焊接工作时，也必须重新考试（第四十条）	持证手工焊焊工或者焊机操作工某焊接方法中断特种设备焊接作业 6 个月以上，该手工焊焊工或者焊机操作工若再使用该焊接方法进行特种设备焊接作业前，应当复审抽考（第二十九条）
9	没有焊缝质量汇总结果，也没有焊工解除聘用关系后，原用人单位有责任向发证机关提供焊工焊接档案资料	用人单位应当根据本细则规定，结合本单位的实际情况，制定焊工管理办法，建立焊工焊接档案。焊工焊接档案应当包括焊工焊绩、焊缝质量汇总结果、焊接质量事故等内容，并且作为焊工的取证和复审提供客观真实的证明资料 焊工解除聘用关系后，原用人单位有责任向发证机关提供焊工焊接档案资料（第三十五条）

续表

序号	2002版《锅炉压力容器压力管道焊工考试规则》	TSG Z6002—2010《特种设备焊接操作人员考试细则》
10	焊接工艺因素为9个	焊接工艺因素增加了11个(表A-5) 钨极气体保护焊、熔化极气体保护焊和等离子弧焊时，背面保护气体：有背面保护气体代号为10，无背面保护气体代号为11；钨极气体保护焊电流类别与极性：直流正接代号为12，直流反接代号为13，交流代号为14；熔化极气体保护焊：喷射弧、熔滴弧、脉冲弧代号为15，短路弧代号为16；各种焊接方法的机动焊：目视观察、控制代号为19，遥控代号为20
11	无对应条款	手工焊焊工采用异类别钢号组成的管板角接头(或者管材角焊缝)试件，经焊接操作技能考试合格后，视为该焊工已通过试件中较高类别钢的焊接操作技能考试(A4.3.2.1.2)
12	没有要求	焊机操作工采用某类别填充金属材料，经焊接操作技能考试合格后，适用于焊件相应种类的各类别填充金属材料(A4.3.3) 注：填充金属类别考试时，采用埋弧焊碳钢焊丝，考试合格后适用于碳钢、低合金钢、高金钢焊接
13	只有01、02、03、04、06、08中某一代号因素变更时，焊工需重新进行焊接操作技能考试[第十五条(四)款]	焊接工艺因素代号中增加10、12、13、14、15、16、19、20、21、22中某一代号因素变更时，焊工需重新进行焊接操作技能考试
14	首层至少堆焊三条并列焊道，总宽度大于或者等于38mm	堆焊试件焊道熔敷金属宽度应当大于12mm，首层至少堆焊3条并列焊道，总宽度大于或者等于38mm(A4.4.3)
15	基本知识考试不低于70分为合格(第二十四条)	基本知识考试不低于60分为合格[A5.1(1)项]
16	管对接焊缝试件，当管外径＜76mm时应作断口检验(表12)	取消断口检验的规定。增加了焊缝射线检测要求(表A-14)
17	管板角接头试件“管侧焊脚尺寸为T+(0～3)mm”[第二十七条(二)款(2项)]	修改为“管侧焊脚尺寸为0.5T+1T”[A5.2.2.3.2(3)项]
18	采用渗透方法进行检测，缺陷评定结果不低于Ⅱ级(第二十八条)	堆焊试件表面按照JB/T 4730《承压设备无损检测》标准采用渗透方法检测，焊缝质量等级为Ⅰ级[A5.2.3(2)项]
19	管板角接头试件金相检验(宏观)任一试件取3个检查面(表12)	管板角接头试件金相检验(宏观)任一试件取4个检查面(表A-14)
20	堆焊两相邻焊道之间的凹下量不得大于1.5mm[第二十七条(三)项]	堆焊两相邻焊道之间的凹下量不得大于1mm[A5.2.2.3.1(3)项]
21	无此规定	① 抽考方法 a. 在焊工持有项目范围内(可被替代的项目除外)抽考的项目，应当包括每种焊接方法 b. 在同一种焊接方法的项目中，按照手工焊－机动焊－自动焊的替代顺序抽考 在同一种焊接方法、同一机动化程度的若干项目中，当复审焊工或者其代理人在场时，由考试机构随机抽取任一项目，作为复审抽考项目 ② 抽考项目结果判定 a. 抽考项目合格，则相同焊接方法中的所有项目继续有效 b. 抽考项目不合格，则相同焊接方法中的所有项目不再有效

续表

序号	2002 版《锅炉压力容器压力管道焊工考试规则》	TSG Z6002—2010《特种设备焊接操作人员考试细则》
22	图 1(e) 2002 版 6FG 试件 管向上  	图 A-1(e) 管向下  45° 固定试件代号6FG
23	被吊销焊工合格证者，一年后方可提出焊工考试申请(第四十一条)	以考试作弊或者以其他欺骗方式取得《特种设备作业人员证》的焊工，吊销证书后 3 年内不得重新提出焊工考试申请(第三十二条)

注：本表是针对不锈钢焊接操作人员考试与管理，列出的与 2002 版《锅炉压力容器压力管道焊工考试规则》的主要变化。

表 10-2　焊接方法及代号[2]

焊接方法	代号
焊条电弧焊	SMAW
钨极气体保护焊	GTAW
熔化极气体保护焊	GMAW(含药芯焊丝电弧焊 FCAW)
埋弧焊	SAW

(8) 试件焊接要求[2]

按评定合格的焊接工艺焊接，试件开始施焊后试件的位置不得改变；定位焊缝应在坡口内施焊，焊件焊后焊缝表面不得打磨，不允许多焊试件从中挑选。TSG Z6002—2010 规定板状对接试件和管状对接试件焊后按 JB/T 4730—2005《承压设备无损检测》作 100%RT 检测，检测技术等级不低于 AB 级，焊接接头质量不低于Ⅱ级为合格。

(9) 考试项目表示方法

TSG Z6002—2010 规定考试项目代号按焊接机械化程度来表示，具体表示方法如下。

a. 手工焊焊工操作技能考试项目表示为①-②-③-④/⑤-⑥-⑦，如果操作技能考试项目中不出现其中某项时，则不包括该项。项目具体含义如下。

①——焊接方法代号，见表 10-2，耐蚀堆焊加代号（N 与试件母材厚度）。

②——金属材料类别代号，见 TSG Z6002—2010 的表 A-2，试件为异类别金属材料用“×/×”表示。

③——试件位置代号，见 TSG Z6002—2010 的表 A-4，带衬垫加代号“(K)”。

④——焊缝金属厚度（对于板材角焊缝试件为试件母材厚度 T）。

⑤——外径。

⑥——填充金属类别代号，见 TSG Z6002—2010 的表 A-3。

⑦——焊接工艺因素代号，见 TSG Z6002—2010 的表 A-5。

b. 焊机操作工操作技能考试项目表示为①-②-③，项目具体含义如下。

①——焊接方法代号，见表 10-2，耐蚀堆焊加代号（N 与试件母材厚度）。

②——试件位置代号，见 TSG Z6002—2010 的表 A-4，带衬垫加代号“(K)”。

③——焊接工艺因素代号，见 TSG Z6002—2010 的表 A-5。

c. 考试项目示例。板厚为 12mm 的 06Cr19Ni10 钢板，采用焊条电弧焊，平位单面焊接，焊条为 A137，填满坡口，项目代号为 SMAW- FeⅣ-1G-12- Fef4J。

(10) 合格项目适用范围

不同的考试规则焊工合格项目适用范围有所不同，下面以 TSG Z6002—2010 为例介绍按该考规的合格项目适用范围。

① 焊接方法为手工操作，焊缝金属厚度适用范围与试件的焊缝金属厚度有关，板状对接焊缝金属厚度大于或等于 12mm，且焊接层数不少于 3 层，焊接产品时，焊缝金属厚度不受限制。

② 板状对接试件考试合格后，可焊对接板状焊缝、直径大于 76mm 的对接环焊缝、角焊缝。

③ 直径大于 25mm 的管状对接试件考试合格后，可焊直径大于或者等于 25mm 的对接焊缝。

④ 直径大于 25mm 的管板试件考试合格后，可焊直径大于或者等于 25mm 的管板角接头焊件。

⑤ 某类别钢材采用埋弧焊考试合格后，所焊工件在主要因素不变的情况下，可焊接的钢材类别、母材厚度不受限制。无自动跟踪系统的埋弧焊考试试件考试合格后，可免去有自动跟踪系统的埋弧焊考试。埋弧焊试件，每面坡口多道焊的试件考试合格后，可免去每面坡口单道焊的试件考试。

10.1.2 焊工的持证上岗管理

焊工的持证上岗管理是焊工管理环节最重要的控制点[1]。

① 企业的焊接责任工程师是焊工管理的主管负责人，焊接责任工程师应及时编制考试培训计划，焊工证到期前应提前安排培训和考试，避免超期上岗。焊工经培训考试合格，取得焊工合格证书，并将合格项目及发证日期、有效日期记录在焊工证上。

② 焊工认真执行焊接工艺，按焊接工艺规定的持证项目上岗。每个持证焊工只能在自己考试合格项目中规定的范围内从事焊接作业，绝不允许超越范围施焊。例如，领取焊条电弧焊操作持证焊工不允许从事气体保护焊的操作；碳钢或低合金钢考试合格（手工操作焊接）的焊工不允许焊接不锈钢产品；对于只有平焊位置考试合格的持证焊工不能在产品上从事横焊、仰焊和立焊位置的作业。

焊接检验人员应认真检查、认真填写焊接检查记录，发现无证上岗、超项上岗或超期上岗应及时制止。

③ 焊接责任工程师应认真在焊工档案中记录焊工的焊绩，防止从档案中找不出未中断 6 个月受特种设备焊接工作的证据。焊工某种焊接方法连续中断特种设备的焊接工作 6 个月以上，重新从事受监察的设备焊接工作时，应按规定抽考合格。

④ 企业应给持证焊工钢印统一编号，焊工钢印号应与焊工证书编号一致，焊工钢印由焊工妥善保管。压力容器产品，须在施焊记录中认真记录焊工钢印号。焊工须认真地在其所焊的压力容器焊缝规定的位置上作好焊工号标记。

⑤ 有关人员应清楚焊工合格项目的替代关系，防止误认现有的项目就可替代需要的项目，而实际上标准规定不能替代，造成超项上岗。

⑥ 遇到新工艺、新方法、新材料的焊接工作，应及时培训焊工，并及时做增项考试，

防止超项上岗。

⑦ 焊工档案管理。

焊工档案和焊工证是焊工资格的证实性文件，焊工档案的管理是焊接质量控制系统中焊工管理控制环节的控制点[1]。

a. 焊工档案的管理。焊工合格证书和焊工档案由企业的焊工考试委员会或焊接责任工程师集中保管。焊工焊绩由车间（或施工队）汇集检验部门提供的焊工质量考核数据，逐月报给焊接责任工程师。焊接责任工程师负责整理、填写焊工焊绩档案。

b. 焊工档案的内容。焊工档案的内容包括焊工的自然情况（如焊工的姓名、性别、出生年月、参加工作时间、从事焊接工作的时间、学历、工作简历等自然情况）；焊工培训、考试记录（如焊工培训与考试的内容、时间、项目、成绩、理论考试试卷、实际操作考试记录、考试试件的射线检测报告、弯曲、宏观金相试验报告等）；焊工证书编号；焊工钢印号；焊工发生的焊接质量事故、受奖受罚情况，免试登记等。

10.1.3　特种设备焊工复审管理

按 TSG Z6002—2010 首次取得的特种设备合格项目在第一次复审时，需要重新进行考试；第二次以后（含第二次）复审时，可以在合格项目范围内抽考。

（1）复审（满足以下所有要求的为复审合格）

① 提交的复审申请资料真实齐全；申请复审时，持证焊工应当提交以下资料。

a.《特种设备焊接操作人员复审申请表》。

b.《特种设备作业人员证》（原件）。

c.《特种设备焊接操作人员焊绩记录表》。

d.《特种设备焊接操作人考试基本情况表》。

e. 焊接操作技能考试检验记录表。

f. 医疗卫生机构出具的含有视力、色盲等内容的身体健康证明（原件）。

g.《特种设备焊接操作人员复审申请表》由聘用焊工的单位（以下简称用人单位）或者培训机构签署意见，明确申请人经过安全教育和培训的内容及课时，有无违规、违法等不良记录。

② 年龄不超过 55 周岁（超过 55 周岁的按照 TSG Z6002—2010 第二十九条要求）的。

③ 没有因违反工艺纪律以致发生重大质量事故的。

④ 重新考试合格的项目或者按照 TSG Z6002—2010 附件 A 的 A8 抽考合格。

（2）抽考方法

① 在焊工持有项目范围内（可被替代的项目除外）抽考的项目，应当包括每种焊接方法。

② 在同一种焊接方法的项目中，按照手工焊－机动焊－自动焊的替代顺序抽考。

在同一种焊接方法、同一机动化程度的若干项目中，在复审焊工或者其代表在场的情况下，由考试机构随机抽取任一项目，作为复审抽考项目。

（3）抽考项目结果判定

① 抽考项目合格，则相同焊接方法中的所有项目继续有效。

② 抽考项目不合格，则相同焊接方法中的所有项目不再有效。

10.2　材料的质量控制

为了保证不锈钢焊接产品制造过程中的质量，除了人的素质外，对材料亦应有严格的要求。焊接产品的材料，包括母料和焊接材料两部分。

10.2.1 母材的质量控制

① 用于制造不锈钢焊接产品的母料，应根据设计图样的要求，选择符合相应的国家和行业标准的钢号；用于压力容器的进口材料其技术性能，除符合国外有关标准的同时，还必须符合我国有关标准、规范。

产品材料的质量证明书应由材料生产单位提供，内容要有钢号、规格、供货状态、炉（批）号、化学成分和力学性能等，内容应齐全、准确。

② 境外牌号材料用于压力容器制造的限制要求。

压力容器制造单位应当对进厂材料与材料质量证明书进行审核，并且对材料的化学成分和力学性能进行验证性复验，符合 TSG R0004—2009《固定式压力容器安全技术监察规程》（以下简称 TSG R0004—2009）及其相应材料标准的要求后才能投料使用。

对于采购的第Ⅲ类压力容器用Ⅳ级锻件，以及不能确定质量证明书的真实性或者对性能和化学成分有怀疑的主要受压元件材料，压力容器制造单位应当进行复验，符合 TSG R0004—2009 及其相应材料标准的要求后方可投料使用。

③ 不锈钢材料需做晶间腐蚀复验的，应按 GB/T 4334—2000《不锈钢耐腐蚀试验方法》进行，设计图样另有规定的除外。

④ 用于制造容器及锅炉构件的不锈钢材料，不得有分层，表面不允许有裂纹、结疤，经酸洗供应的不锈钢表面不允许有氧化皮和酸洗后的痕迹等。

⑤ 不锈钢原材料应按牌号、规格、交货热处理状态、炉（批）号分类在室内放置，并与碳钢、低合金钢材料有严格的隔离措施。

⑥ 不锈钢材料上需有清晰的材料标记。该标记需采用无氯、无硫记号笔书写，不得打钢印，不得使用油漆等有污染的物料书写。钢材发放时要核对标记移植无误后下料。

10.2.2 焊接材料的管理

焊接材料管理是材料质量控制和焊接质量控制的一个交叉点。材料责任人员应对焊接材料管理负责，焊接责任人员应配合、协助。在焊接材料管理这一控制环节中，有焊接材料采购、一级库的管理、二级库的管理等控制点。焊接材料控制的主要目的是确保焊接材料符合标准，有优良的质量。焊接材料一级库、二级库的入库、保管、出库、烘干、发放、回收要防错、防混、防潮、防锈，实现焊接材料使用的可跟踪、可追溯，确保焊接材料干燥，防止焊接时产生缺欠。

（1）焊接材料采购

焊接材料采购的品种、规格、数量应由计划部门根据焊接工艺的要求确定，提交材料供应部门拟定采购计划。

焊接工艺人员应经常征求并收集车间焊工对于常用焊接材料质量情况的意见，综合焊接材料复验的结果，提出常用焊接材料采购说明，并推荐质量较好较稳定的焊接材料生产厂。

焊接工艺人员在焊接工艺中采用新焊接材料时，应收集并分析新焊接材料的有关技术资料、标准和供应信息，提出新焊接材料有关技术要求、验收标准及推荐焊接材料生产厂家的焊接材料采购说明书。焊接材料采购说明书经焊接责任工程师批准后交材料采购部门按采购计划采购。

（2）一级库的管理

① 焊接材料验收。

a. 质量证明书检验。所有焊接材料交货时都必须按相应标准的规定提供质量证明书原件，内容必须齐全、清晰，并加盖焊接材料生产单位质量检验章。从非焊接材料生产单位购

买时，应同时取得焊接材料质量证明书原件或加盖供材单位检验公章和经办人章的有效复印件。采购人员和焊接材料管理人员应核对进货的焊接材料实物与焊接材料质量证明书，并对其真实性与一致性负责。

b. 包装及外观检验。进货时，应检查焊接材料包装是否完好，有无破损、受潮或被污染。

应检查焊接材料的标志是否有清晰、牢固的标记，是否包括焊接材料制造的标准代号、材料牌号及规格、炉（批）号、焊接材料生产厂名称及检验印鉴标志，并核实以上标志与实物是否相符。

c. 焊接材料复验。除了标准、法规规定进行复验的焊接材料以外，对有疑点的或用于重要用途的焊接材料，应进行复验。

焊条复验主要检验焊条药皮强度、药皮偏心度、焊头焊尾、焊接工艺性能（包括电弧稳定性、再引弧性能、熔渣流动性、不同焊接位置的适应性、飞溅、烟尘、脱渣性、焊缝成形、焊接缺陷等）、熔敷金属力学性能、化学成分。

焊丝主要复验镀层质量、松弛直径和翘距、焊丝化学成分。

焊剂复验主要检验颗粒度、色泽是否均匀一致、与焊丝搭配焊接的焊接工艺性能、熔敷金属化学成分、机械性能。

验收合格的焊接材料应在每个包装上作专门标记。

② 焊接材料入库。一级库应根据需要划分为“待检”、“合格”及“不合格”三个区域，若同时制造压力容器与一般钢结构的单位，还应划分压力容器焊接材料区及非压力容器焊接材料区，各区域要有明显的标记和分界。

一级库管理员应将验收合格的焊接材料进行入库登记。登记的内容应包括焊接材料的名称、牌号、规格、批号或炉号、企业内部材料（移植）代号、数量或重量、生产日期、入库日期、有效期、生产单位。

入库后，管理员应建立相应的库存档案，应包括入库登记、质量证明书、验收检验报告、检查记录、发放记录等。

③ 焊接材料保管。压力容器制造厂和锅炉制造厂为了确保焊接接头质量，对焊接材料管理应制定一套严密的管理制度。入厂的焊接材料必须统一集中放在一个专用的库房内，这库房称为焊接材料一级库。对焊接材料一级库的要求如下。

一级库内必须保持空气干燥，通风良好，室内温度在 5℃以上。焊接材料一级库不允许放置有害气体和腐蚀介质，室内应保持整洁。室内应有温度计、相对湿度计、去湿机，当相对湿度较高时，应开机除湿，保持相对湿度不超过 60%。库房管理人员应每天早、中、晚三次测量记录一级库的相对湿度。焊接材料应存放于室内的架子上，架子离地面距离应不小于 300mm，离墙的距离不小于 300mm，并应分类码垛，每垛的种类、牌号、规格、炉（批）号应一致。库存期间不得损坏原包装[3]。

库房管理人员应定期对库存焊接材料进行检查，并将检查结果作书面记录，发现由于保存不当而出现可能影响焊接质量的缺陷时，应向材料责任工程师和有关职能部门反映并及时处理。

④ 出库。库房管理人员应根据车间提交的领料单，核对焊接材料供料计划，核对无误后发放焊接材料。

为保证焊接材料在规定期限内得到使用，避免库存超期引起不良后果，焊接材料发放应按先入先出的原则。规定期限如下。

a. 焊接材料质量证明书或证明书推荐的期限。

b. 非低氢型焊条及包装密封良好的低氢型焊条为生产日期后两年。

c. 除不锈钢焊丝、熔炼焊剂及 a、b 情况以外的其他焊接材料保存期限为自生产日期起计算为期 1 年。

库存超过规定期限的焊条、焊剂或虽未到期，但保管中受潮、变质的焊接材料，需复验合格后方可发放使用，否则按不合格焊接材料处理。

(3) 二级焊接材料库的管理

使用焊接材料数量较多的分厂或车间，应设立二级焊接材料库（存放由一级库所领来的焊接材料的专门场所）。二级焊接材料库的任务是烘干焊条和焊剂，有控制地发放焊接材料并回收剩余的焊条、焊剂、焊条头和焊丝。

① 对焊接材料二级库有如下要求。

a. 从一级库领来的焊接材料在使用前须按批号存放在二级库内，由二级库管理员负责保管、发放、回收。焊接材料从一级库拨至二级库，两库的管理人员应办理交接手续，二级库管理员应负责核对焊接材料的种类、牌号、规格、炉（批）号、数量或重量。

b. 二级库应有足够的焊条、焊剂烘干及恒温存放的烘干箱、电热恒温箱，箱上均应有可靠而且经检定的温度控制、保温时间控制及显示装置。每天将发放使用的焊条和焊剂按规定的烘干温度和保温时间进行烘干。

c. 二级库内应有焊条保温筒预热装置，每天在存放焊条前应对焊条保温桶先进行预热，避免烘干的焊条直接放入冷态焊条保温桶内，导致迅速冷却，药皮开裂。

d. 焊接材料的发放与回收。焊工凭焊接材料领用单到二级库领取焊接材料，领用单应注明领用的焊接材料牌号、规格、数量及用于焊接的产品名称、产品编号、接头编号、领用人和领用日期。二级库管理员应核对计划按领料单发放，并同时在领料单上填写焊接材料批号、领用时间并在发放人处签字，填写焊接材料领退记录。焊工领取焊条时必须携带焊条保温筒。领出的焊条超过 4h 后，应退回焊接材料库重新烘干，用剩的焊条及焊条头亦应退回二级库。焊条退回时，二级库管理员应在焊接材料领用单和焊接材料领退记录中如实填写退回的焊接材料数量。退回的焊条其种类、牌号、规格、批号应与发出的相同，回收后仍按原牌号、规格、批号存放保管，不得混淆。回收的焊条有药皮剥落或其他缺欠者，应剔除。烘干温度超过 350℃的焊条其重复烘干次数不宜超过 3 次，对于低温压力容器或球形储存容器，烘干温度超过 350℃的焊条其重复烘干次数不宜超过 2 次[3]。

二级焊材库应有焊接材料烘干指示板，指示板内容见表 10-3。

表 10-3 焊接材料烘干指示板内容

烘箱编号	焊材名称	炉(批)号	企业内部材料编号	规格	数量	烘干温度及保温时间
1	上层					
	中层					
	下层					
2	上层					
	中层					
	下层					
3	上层					
	中层					
	下层					

② 二级库的焊接材料保管。二级库的焊接材料保管要求与一级库的焊接材料保管要求一致。由一级库拨至二级库的焊接材料以满足车间一周用量为宜，较长时间不用或剩余的焊接材料，应退回一级库保管。

③ 焊条、焊剂的烘干及恒温保存。二级库管理员应根据车间预先提出的施工计划烘干焊条、焊剂，其品种、牌号、规格、数量应与计划一致。二级库管理员应严格按技术要求烘干和恒温存放焊条、焊剂，并如实作好焊接材料烘干记录。焊接材料的烘干温度、烘干时间、恒温存放温度都应符合规定。

a. 焊条烘干。

ⅰ. 非低氢型焊条的烘干。非低氢型焊条药皮一般均有含结晶水的物质和或多或少的有机物。烘焙温度稍高，有机物就会分解，所以非低氢型焊条的烘干以既去除药皮中的吸附水，又不使有机物分解为原则。一般 150℃烘干 1h。

ⅱ. 低氢焊条的烘干。低氢型药皮焊条烘干温度低于 400℃时，随着温度的升高，吸附水明显减少，焊缝金属扩散氢含量也明显减少，而烘干温度超过 400℃后，烘干温度和时间的增加已对扩散氢含量降低作用不明显，而且烘干温度高达 437～500℃就会使药皮中的碳酸分解，铁合金氧化失效，因此烘干温度不得超过 430℃，通常为 350～400℃烘干 1h。

ⅲ. 焊条烘干时应注意以下几点。

• 烘干焊条时，严禁将焊条突然放进高温炉内，或从高温炉中突然取出冷却，防止焊条因骤冷骤热而发生药皮开裂脱落。

• 焊条烘干时，因其导热性不好，表现温度不均匀，不应成垛或成捆地堆放，应铺放成层状，避免焊条烘干时受热不均匀和潮气不易排除。应用多层分隔，使用鼓风均热或用远红外加热，远红外线可被固有振动频率与之相同或相近的物体分子吸收，引起分子共振而发热，使焊接材料升温速度快，干燥效果好。焊条堆放不能太厚（一般不超 3 层）。

• 若低氢型焊条在常温下存放超过 4h 时，应重新烘干，重复烘干次数不宜超过 3 次（球形储存容器或低温压力容器用低氢型焊条重复烘干次数不宜超过 2 次）；焊条烘干时应作记录，记录上应有牌号、批次号、温度、时间等内容[1]。

• 不允许烘干温度、保温时间要求不同的焊接材料同炉烘干。焊接材料在烘干箱内或恒温箱内应有牌号、规格、炉（批）号的标志，以免混淆。

b. 焊剂烘干。

ⅰ. 熔炼型不锈钢焊剂。对于熔炼型不锈钢焊剂，烘干温度为 300～400℃，保温 2h。

ⅱ. 烧结型不锈钢焊剂。烧结型不锈钢焊剂，烘干温度为 300～350℃，保温 2h。

ⅲ. 焊剂烘干注意事项。

• 焊剂烘干前要对焊剂粒度进行筛选。焊剂的粒度一般分为两种，一种是普通粒度，为 2.5～0.45mm（8～40 目）；另一种是细粒度，为 1.25～0.25mm（14～60 目）。在焊剂中允许存在的小于规定粒度的细粉一般不大于 5%，大于规定粒度的粗粉不大于 2%。焊剂烘干时所作记录与焊条烘干时相同，并填入产品制造工序过程卡中。

• 焊剂烘干时，因其导热性不好，表现温度不均匀，焊剂厚度不超 60mm。使用鼓风均热或用远红外加热，远红外线可被固有振动频率与之相同或相近的物体分子吸收，引起分子共振而发热，使焊剂升温速度快，干燥效果好。

• 不允许烘干温度、保温时间要求不同的焊接材料同炉烘干。焊接材料在烘干箱内或恒温箱内应有牌号、规格、炉（批）号的标志，以免混淆。

10.3 焊接工艺评定

10.3.1 焊接工艺评定、试验方法和合格标准

承压设备的焊接工艺评定必须遵循 NB/T 47014—2011（JB/T 4708）《承压设备焊接工艺评定》（以下简称 NB/T 47014—2011）标准。尿素高压设备的超低碳奥氏体不锈钢材料晶间腐蚀性能试验应执行 ZBG 93001～93003 的规定。

10.3.2 焊接工艺评定的时机要求

焊接工艺评定应由施焊单位在产品焊接之前完成，通过测定焊接接头是否具有所要求的使用性能，从而验证本单位拟定的焊接工艺的正确性[4]。

焊接工艺是保证焊接质量的根本，焊接过程是特殊过程，焊接工艺在使用之前必须预先进行验证鉴定。

10.3.3 耐蚀评定

（1）耐蚀层堆焊评定

当进行耐蚀层堆焊时，堆焊层的化学成分是保证耐蚀性的基础，堆焊层化学成分是否符合规定，是验证所拟定堆焊工艺正确性的判断准则[4]。

（2）晶间腐蚀评定

当压力容器是按化工容器标准设计制造时，当母材有晶间腐蚀倾向时，焊接工艺评定须作晶间腐蚀焊接工艺评定[5]。

10.3.4 焊接工艺评定不得外输入

焊接工艺评定在本单位进行，在评定本单位拟定的焊接工艺时，实际上也评定了本单位的焊接能力和焊接质量控制能力。焊接评定是本单位焊接能力的体现，是获得优良的焊接质量的保证。若不具备独立作焊接工艺评定的条件，或自行拟定的焊接工艺评定不合格，这样的单位就不能焊制出合格产品。焊接工艺评定不得委托外单位焊接试件，也不能借用外单位的焊接工艺评定。

10.3.5 焊接工艺评定的一般过程

焊接工艺评定的一般过程：拟订预焊接工艺规程→通知监检部门→焊接试件→检验试件→制取试样和检验试样→施焊试件和制取试样→检测焊接接头是否具有所要求的使用性能（含抗拉强度、弯曲性能、金相组织）→形成焊接工艺评定报告对拟订的预焊接工艺规程进行评价→技术负责人审批→监检部门确认→存档[4]。

其中拟订预焊接工艺规程、焊接工艺评定试验、焊接工艺评定报告是本控制环节的三个控制点[1]。

拟订预焊接工艺规程应注意焊接工艺因素的相互影响联系。拟订预焊接工艺规程应尽量加大焊评覆盖范围。

10.3.6 焊接工艺评定试验

焊接工艺评定试验由主管焊接试验的焊接工艺人员或焊接责任工程师负责组织实施，在焊接试验室进行。

(1) 焊接试验室应具备的条件

① 有技能熟练、经验丰富、技术全面的焊工。

② 有齐全完好的焊接设备。

③ 有必备仪表和量具且经计量检定合格，并在检定周期内。

④ 有试件和试样加工、焊后热处理、无损检测、理化试验等可靠及时的配合。

⑤ 有保管焊接工艺评定技术档案和试样的条件。

(2) 焊接工艺评定的试件焊接及检验

① 做好准备工作。焊接工艺评定试验试件的焊接应由本单位熟练焊工使用本单位的完好焊接设备，用符合标准的焊接材料、钢材进行焊接。试件应有钢材标记移植，焊接材料应按规定烘干，恒温存放，并用焊条筒领用到试验室。焊接前应认真清理坡口，并检验坡口形状尺寸。

母材、焊接材料、坡口都必须符合焊接工艺指导书的要求，试件的数量和尺寸应满足制备试样的要求。

② 按预焊接工艺规程焊接试件。焊接技术人员应将拟定好的预焊接工艺规程交给焊接试件的焊工，并详细介绍该焊接工艺的特点、要求和注意事项，使焊工能在试件施焊中更好地执行焊接工艺。

③ 认真作好焊接试验记录。焊评试件焊接过程中，焊接试验技术人员应始终在现场认真测定规范参数并认真填写施焊记录。焊接时应使包括预热温度、道间温度在内的所有工艺因素都在拟定的指导书规定范围内。特别是新材料、新方法的焊评试验更应注意试件焊接过程中出现的新情况，以积累经验。

④ 外观检验。焊接工艺评定试件焊后应由焊接检验员作外观检验，并记录外观检验结果。

⑤ 无损检测。对接试件应作射线或超声无损检测，检测人员应出具无损检测报告。

(3) 焊评试样的取样、加工和试验

① 试件允许避开焊接缺欠制取试样[4]。

②试件上试样取样位置和加工要求应按 NB/T 47014—2011 或相应的焊评标准执行。

③ 焊评试验中外委工作的质量控制。

a. 受委单位应具备一定的资质和足够的能力，并与本单位签有合同协议[6]。

b. 外委的试样加工、理化试验和焊后热处理应有委托书、试样加工图、理化试验申请单、焊后热处理工艺，并注明以上工作应遵循的标准。

c. 合同中应约定试样加工后的检查、理化试验过程、焊后热处理装炉等技术要求，受委托单位应通知有关责任人员到场监督。

d. 受委托单位应向委托单位提交试样加工检查记录、理化试验报告、仪器自动记录的热处理记录曲线[7~9]，并保证所提交资料的真实性和正确性，同时应有操作人、检验员、部门负责人的签字盖章。委托单位应由检查责任工程师分别审查所提交的记录、试样和报告，并由焊接责任工程师验收归档。发现问题应及时与受托方有关人员沟通解决。

10.3.7　焊接工艺评定报告

(1) 焊接工艺评定试验数据资料的收集和焊评报告的编制

焊接工艺评定试验用的钢材、焊接材料须有其与炉（批）号对应的材料质量证明书，试验后，检查人员提供的焊缝外观检查记录报告，无损检测人员提供的无损检测报告，焊后热处理提供的热处理记录曲线，理化试验员提供的力学性能试验报告、金相检验报告或化学成分分析报告等。这些都是焊接工艺评定报告数据的来源或试验条件、试验过程、试验结果的

见证件。由于焊接工艺评定的技术档案和试样要保存到焊评失效为止，这些资料是要永久保存的。而其中有些资料数据若由有关人员自行保存（如焊接材料、钢材的质量证明书应由材料管理人员保管），会使这些资料分散，而且保存期可能不一致，这就需要将不能直接归入焊评技术档案的资料复印存档，以便于日常文件的查阅。

焊接工艺评定试验结束后，负责焊接试验的工艺人员应收集焊接试验前拟定的焊接工艺指导书、焊接试验中记录的焊评施焊记录表、无损检测报告、整理试件外观检验记录和试样试验后焊缝外观检查报告、力学性能试验报告、金相检验报告、化学成分分析报告等资料数据，填写焊接工艺评定报告的有关检查和试验记录。在收集整理这些焊接工艺评定试验数据时，应做到齐全正确。

（2）焊评合格与否的判定

负责焊接试验的焊接工艺人员在收集整理焊评试验的资料数据后，依据标准，综合分析，就可作出焊接工艺评定是否合格的结论。

① 外观检验和无损检测。NB/T 47014—2011 标准没有规定把外观检查和无损检测是否合格作为焊评是否合格的依据，甚至规定力学性能试验时允许避开缺欠制取试样。尽管如此，外观检查和无损检测还是提供了一些很重要的信息：产生大量气孔，可能与焊接材料的性能或质量有关；出现数处冷裂纹，可能与预热温度、道间温度过低有关；有较多未焊透，可能与电流小，坡口尺寸不合理有关。这些问题的存在势必影响以后的力学性能试验结果。外观检查和无损检测发现这样的问题，当确信不是偶然出现时，应及时停止焊评试验、分析原因、修改焊接工艺评定指导书，针对发现的问题采取相应措施，如：改用性能和质量符合要求的焊接材料，提高预热温度和道间温度，加大焊接线能量，增大焊接电流或减小坡口钝边、加大坡口角度。

② 理化试验。

a. 若弯曲试验出现超标裂纹，除了有焊接缺陷以外，可能是焊接材料与母材不匹配，焊缝金属强度偏高，弯曲时，弯曲变形集中在焊缝边缘处的热影响区内，使该处过度拉伸伸长而开裂。焊接时热影响区过热，晶粒粗大，强度、塑性均下降，也会出现类似情况。若预热温度和道间温度过低，焊缝和热影响区有淬硬组织，甚至有微小的冷裂纹，弯曲试验会导致开裂。堆焊时过渡层焊条成分不合适或稀释率过大，弯曲时也会开裂。分析原因后，应有针对性地修改工艺因素重新拟定焊接工艺指导书重作焊评。

b. 若是奥氏体钢有热裂纹，多是焊缝形状系数不合适，过窄过深，或钢材、焊接材料含 S、P、O 等杂质过多。

c. 未焊透和未熔合与焊接电流小、焊条直径粗、坡口角度小、钝边尺寸过大有关。

d. 耐蚀堆焊层化学成分分析。当耐蚀堆焊层化学成分分析合金元素不足时，多是由于焊接材料的合金元素含量低，堆焊时稀释率过大或堆焊层数少，堆焊厚度不够等原因所致。修改焊接工艺指导书，选取合金成分较高的焊接材料，使用能减小稀释率和减少合金元素烧损的焊接规范，就能提高合金元素的含量，降低杂质元素的含量。

③ 焊接工艺评定的有效性。焊接标准规定不得借用外单位的焊评报告，也不得由外单位的焊工用外单位的设备来进行本单位的焊评，否则是无效的。

焊评报告编制好以后，还需焊接工艺人员、焊接责任师、技术负责人等人员履行编制、审核、审批签字。还要交监检单位的监检人员确认，方可生效。

④ 焊接工艺评定覆盖范围的确定。

a. 焊接工艺评定覆盖范围是由所执行焊接工艺评定标准决定的。

b. 由重要因素和补加因素确定。有人认为，焊接工艺评定的覆盖范围就是其覆盖的母材厚度和熔敷金属厚度，这仅仅是一个方面。其实它的覆盖范围包含了所评定的工艺的所有

重要因素和补加因素相同或同一覆盖范围内的焊接工作。

焊接工艺要将焊接工艺评定的情况整理成一个“焊接工艺评定一览表”，就是为了让有关人员能通过这个表了解各个焊评的重要因素和补加因素，从而知道它的覆盖范围。

⑤ 影响焊接工艺评定覆盖率的一些情况[1]。

压力容器安全监察部门要求各制造单位的焊接工艺评定覆盖率达到 100%，但从压力容器制造行业检查的情况来看，事实上好多制造单位并未达到这个水平。其主要原因有以下几点。

a. 焊接工艺评定与产品焊接工作同时进行甚至滞后，产品焊接工作没有焊评覆盖。

b. 有些单位的焊评不是本单位做的，有的是某个行业统一做的，有的是请外单位人做的。

c. 企业从未进行过进口钢材焊接工艺评定，只根据掌握的该钢号焊接性能、化学成分、力学性能与国产钢号相当，就直接用国产钢的焊评覆盖。

d. 焊后热处理类别改变（如封头拼接后热压用不进行焊后热处理的焊评去覆盖），未重新作焊评。

e. 低于下转变温度焊后热处理的焊接工艺评定试件保温时间为 1h，但产品焊后热处理保温时间需要 2h 或更长，支持产品焊接的焊评报告记录的保温时间少于焊件在制造中累计保温时间的 80%，未重新作保温时间长的热处理焊评。

f. 产品用多种方法焊接同一焊缝，引用多个单一焊评来覆盖焊接工艺，考虑板厚时，用多个工艺评定叠加，实际超出了板厚覆盖范围。

g. 多种焊接方法组合评定支持某一方法的焊评，只考虑了板厚覆盖范围，未考虑焊缝金属厚度覆盖范围。

h. 考虑特殊焊接条件下的厚度覆盖范围，如：除气焊外，试件超过转变温度的焊后热处理，适用于母材厚度只为 1.1t，仍按 1.5t 或 2t 考虑。

i. 等厚对接（包括 T 形接头对接焊缝），焊评厚度只能覆盖薄件，没有覆盖厚件的焊评。

j. 曲试验弯心直径不符合标准或支座间距不符合标准，试样压偏或压斜。

k. 焊接方法组合焊接评定，未对每一种焊接方法（或焊接工艺）的焊缝和热影响都做冲击试验或测定每种焊接方法的焊缝金属，即未确定每种焊接方法的焊缝金属适用范围。

l. 用较薄板的焊评去覆盖较厚板的焊接，虽然也在板厚覆盖范围之内，但厚板预热，薄板不预热，未重新作预热的焊评。

m. 所用的焊接材料超出了所选焊评报告的适用范围。

10.3.8　奥氏体不锈钢制的低温焊接工艺评定值得注意的问题

（1）冲击试验温度

当设计文件或相关技术文件没有规定时，不高于承压设备的最低设计金属温度（GB 150.4—2011 的 7.2.3 规定：当设计温度低于－192℃时，其冲击试验温度取－192℃）。

（2）冲击吸收功 KV_2 验收指标

NB/T 47014—2011 规定对奥氏体不锈钢的低温的焊缝冲击试验 3 个标准试样的冲击功 KV_2［KV_2 的含义：冲击试样为 V 形缺口，冲击摆锤（打击试样部位）的圆弧半径为 2mm 时的冲击吸收能量］，应符合设计文件或相关技术文件规定，且不应低于 31J，至多允许有一个试样的冲击吸收功低于规定值，但不得低于规定值的 70%。

宽度为 7.5mm、5mm 的小尺寸冲击试样的冲击功指标，分别为标准试样冲击功指标的 75%、50%。

10.3.9 焊接工艺评定报告与预焊接工艺规程编号规则

(1) 预焊接工艺规程（指导书）编号规则

① 预焊接工艺规程的编号由焊接方法-试件类别-试件规格组成，结构如图 10-1 所示。

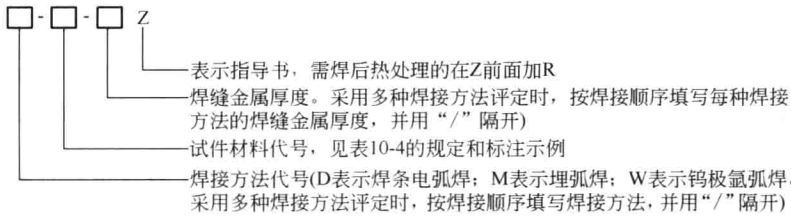


图 10-1 预焊接工艺规程编号规则

表 10-4 试件材料代号的规定和标注示例

试件材料代号	代号含义	试件材料代号	代号含义
1	FeⅠ-1 钢	1/8	FeⅠ-1 钢与Ⅷ类钢组成的异种材料试件
2	FeⅠ-2 钢	2/8	FeⅠ-2 钢与Ⅷ类钢组成的异种材料试件
8	Ⅷ类钢	1/2	FeⅠ-1 钢与 FeⅠ-2 钢组成的异种材料试件

注：本表应根据具体企业的焊接生产任务补充完善。

② 预焊接工艺规程（指导书）编号示例。试件厚度为 10mm 材料为 06Cr19Ni10 对接状试件，打底焊采用钨极氩弧焊，焊缝金属厚度为 3mm，其余焊缝采用焊条电弧焊焊满，其焊接工艺评定报告编号为 W/D-8-3/7Z。

(2) 焊接工艺评定报告编号

① 焊接工艺评定报告的编号如图 10-2 所示。

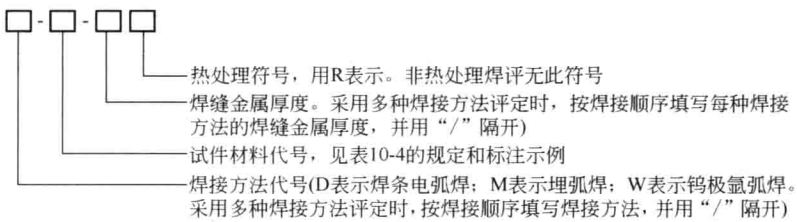


图 10-2 焊接工艺评定报告的编号规则

② 焊接工艺评定报告编号示例。试件厚度为 10mm 材料为 06Cr19Ni10 对接状试件，打底焊采用钨极氩弧焊，焊缝金属厚度为 3mm，其余焊缝采用焊条电弧焊焊满，其焊接工艺评定报告编号为 W/D-8-3/7。

10.4 焊接工艺文件

焊接工艺文件是焊接施工的指导性文件。焊接工艺是在焊接专业知识与焊接施工积累经验的基础上，根据本单位的具体情况和产品焊接的实际需要而制订，而且经过焊接工艺评定验证过的。焊接工艺对参加施焊的焊工应具备什么样的持证项目、使用什么焊接方法、用什么焊接设备，用什么焊接材料，以哪个（或哪些）焊接工艺评定来覆盖产品接头的焊接工

艺、产品和试件应如何焊接、焊接接头返修应如何进行等作出具体详细的规定。焊接工艺涉及了焊接质量控制系统的各个环节，决定了焊接系统的各种资源如何利用，规定了焊接过程的各项活动如何进行，对产品焊接质量的形成和优劣起了决定性的作用[1]。

10.4.1　焊接工艺文件的种类

① 焊接工艺文件包括预焊接工艺规程（pWPS）、焊接工艺规程（WPS）、焊接作业指导书（WWI）、通用焊接工艺文件、焊接工艺守则（或技术规定）等文件。

a. 预焊接工艺规程（preliminary welding procedure specification，pWPS）是为进行焊接工艺评定所拟定的焊接工艺文件[4]。以前称其为焊接工艺指导书[10]。

b. 焊接工艺规程（welding procedure specification，WPS）是根据合格的焊接工艺评定报告编制的，用于产品施焊的焊接工艺文件[4]。

c. 焊接作业指导书（welding working instruction，WWI）是与制造焊件有关的加工和操作细则性作业文件。焊工施焊时使用的作业指导书，可保证施工时质量的再现性。以前称其为焊接工艺卡、焊接工艺规程[4,10]。

② 焊接作业指导书（WWI）。

这是专门为指导某一产品焊接施工而编制的焊接工艺。根据焊接工艺评定报告提供的焊接参数编制焊接工艺文件和焊缝分布图。要求编制出合理的焊接顺序、操作要领和检验要求等，以减少焊接产品的变形和提高其抗裂性和抗腐蚀性能。为了提高焊接接头的抗裂性，采用焊条电弧焊时应选用碱性焊条进行施焊。对于耐腐蚀要求严格的压力容器，从工艺上采取相应的措施，例如：焊接奥氏体不锈钢时，接触腐蚀介质侧的焊缝采用小的热输入且最后施焊。其目的是使接触腐蚀介质焊缝受热温度低，高温停留时间短，有利于提高其耐腐蚀能力。有耐晶间腐蚀要求的不锈钢容器，其接触腐蚀介质的焊缝要严格执行焊接工艺参数，严格控制道间温度。JB/T 4709—2000《钢制压力容器焊接规程》附录 B 焊接工艺规程推荐表格实质是焊接作业指导书。其封面上有产品编号、产品名称、项目名称、编制人和审核人签字等内容。第 2 页是“接头编号示意图和接头编号表”。在接头编号示意图中列出接头编号、焊接工艺卡编号、选用的焊接工艺评定编号、焊接该接头的焊工应具备的持证项目、无损检测要求等。这些内容主要是规定了各个接头的编号以及其对应的工艺资料索引，以便焊接过程中明确各接头的焊接条件和要求，并能实现跟踪追溯；第 3 页的内容是“焊接材料汇总表”，表中列出该产品不同母材焊接时使用的焊接材料牌号、规格、烘干要求；在容器技术特性中列出该产品设计压力、设计温度、试验压力、工作介质、焊接接头系数、容器类别等特性，便于了解该压力容器的概况。其余各页为指导该压力容器各个接头焊接工作的接头焊接工艺卡。这些卡就是压力容器产品焊接作业指导书的主要内容。压力容器产品焊接作业指导书是焊接施工的依据，是施焊中必须遵守的工艺纪律。

③ 焊接工作的工艺守则或基础焊接技术规定。

在产品焊接中，常应用埋弧焊、焊条电弧焊、钨极氩弧焊、熔化极气体保护焊等焊接方法，各种不同的焊接方法都有其特点，焊接时也有其特有应注意的事项。如钨极氩弧焊，焊前要通氩置换气管中的空气，引弧时要提前通氩气，熄弧时要滞后关闭氩气，填充焊丝热端头不应离开喷嘴的氩气保护区等。各种焊接方法应注意的事项不宜放在“焊接接头工艺卡”中反复罗列，而分别集中在钨极氩弧焊工艺守则、埋弧焊工艺守则、CO_2 焊工艺守则中，作为使用该焊接方法时的指导性工艺文件。

不同的钢材各自有不同的焊接性，其焊接工艺也针对其各种特性而有不同的侧重面。奥氏体不锈钢焊接则主要防止焊缝和热影响区过热敏化，避免抗晶间腐蚀性下降；奥氏体不锈钢焊接的工艺措施：主要是小的电流、低电压、快速焊接，道间温度不超过 150℃，控制焊

缝形状系数，减少焊缝杂质。不允许在不锈钢非施焊表面直接引弧。道间温度要测定并作好记录，随制造工序卡进行流转。严格控制焊缝返修次数，对有耐晶间腐蚀要求的焊缝，焊接接头返修后仍应保持其耐蚀性。这些工艺措施也不宜分散重复地罗列在各个产品的“接头焊接工艺卡”中，奥氏体不锈钢焊接工艺守则作为焊接的指导性工艺文件。

产品焊接过程中，有些特定的工作如定位焊、气刨清根、焊接返修等，其本身就是整个焊接工作的一部分，而这些工作又有不同于一般焊接工作的特点。为了更好地指导这些工作，避免在接头焊接工艺卡中分散重复这些要求，编制出定位焊工艺守则、焊缝清根工艺守则（或碳弧气刨工艺守则）、焊接返修工艺守则等。进行定位焊、气刨清根和返修焊时，遵照这些守则。

④ 通用焊接工艺。

有些制造单位批量生产的产品（已形成系列，多规格），如波纹管换热器，这些产品一般不逐台编制焊接工艺规程，往往以通用焊接工艺规程的方式指导其焊接工作。有些压力容器如换热器、塔器、球罐等在制造中各自有其特有的要求，通常也将这些要求编制在各类产品的通用工艺中，与它们的产品焊接工艺作业指导书配合使用。有些制造单位还按产品零部件编制封头拼接、筒体纵缝、环缝焊接的通用焊接工艺。

焊接工艺文件要完整，对产品焊接工作作出全面、具体、细致的规定，使所有的焊接工作都有依据，焊接质量得到保证。

10.4.2 焊接工艺文件的编制、审核

（1）编制焊接工艺规程的范围

压力容器焊制中，下列各类焊缝的焊接工作必须有评定合格的工艺。

① 受压元件的焊缝及其返修焊。

② 与受压元件相焊的焊缝及其返修焊。

③ 熔入永久焊缝内的定位焊。

④ 受压元件母材表面的耐蚀堆焊及其返修焊。

⑤ 在压力容器上临时吊耳和拉盘板等的焊接。

（2）焊接工艺文件的编制原则

① 保证焊接质量，保证焊接接头具有要求的性能。例如，焊接工艺中，焊接材料的选择应注意焊缝与母材的化学成分匹配以保证抗腐蚀性。焊接材料选用不正确，就会影响焊接接头的抗腐蚀性和承载能力，影响焊接接头的质量。

焊接工艺拟订后要评定合格才能用于指导生产，就是为了把好焊接工艺关。

② 在满足焊接质量要求的前提下尽量提高效率，降低成本。同样焊接一条焊缝，采用不同的方法，同样的工艺，在都满足焊接质量要求的前提下，焊接效率和成本是不一样的。如：厚壁高压容器的焊接，采用焊条电弧焊效率较低，成本较高；改用埋弧焊，则效率提高1～3倍，成本只有原来的2/3左右；若改为窄间隙坡口埋弧焊，工作量会减少1/3，效率又提高30%，成本又下降30%[1]。

③ 符合本单位的资源条件，适用可行。上面的例子中，还可以将焊接方法改为电子束焊，也可以提高质量，提高效率。但本单位没有电子束焊设备，没有大型真空工作室，也没有真空电子束焊接厚壁压力容器的成熟经验，这就不符合本单位的资源条件，并不适用可行。焊接工艺要根据本单位的具体条件，适合单位的实际情况。为此，编制焊接工艺文件时，应与焊工多商量，多征求意见。在保证焊接质量的前提下使工艺尽量方便焊工操作，符合本单位的具体条件。

总之，编制焊接工艺文件要注意其正确、合理、经济、先进、适用和可行。审核焊接工

艺也应注意这几个方面。焊接工艺文件的编制由焊接工艺人员负责，焊接工艺文件的审核由焊接责任工程师负责。

10.4.3　焊接工艺文件的更改

（1）焊接工艺文件更改的原因

① 由于技术进步或经验的积累。例如：在推广药芯焊丝 CO_2 焊接技术后，有些原来用焊条电弧焊的工作可以改用药芯焊丝 CO_2 焊了，随之而来，原来的焊接接头坡口的角度为 60°，改用药芯焊丝 CO_2 焊后就可改为 45°。坡口角度的改变，是新材料、新方法的应用，是技术进步带来的工艺改变。

② 由于用户或设计单位的要求。在焊接工艺文件编制以后、产品焊接施工之前，用户或设计单位临时变更结构、尺寸、技术要求，而引起焊接工艺要随之作相应的变更。

③ 材料代用，焊接工艺文件需要随之更改，如：焊件原钢材是 06Cr19Ni10，后代用为 022Cr19Ni10，焊接工艺随之将原来使用的 A102 焊条改为 A002 焊条。

（2）焊接工艺文件更改方法

① 换版或修订。对于因技术进步，经验积累而作的文件更改，应集中在工艺文件换版或修订时进行，由焊接工艺编制人员修订，焊接责任工程师审核。

② 由用户、设计单位、材料供应或其他部门提出代料引起焊接工艺更改应由他们向焊接工艺人员提出更改通知单作为工艺更改输入，焊接工艺人员同意后对焊接工艺作相应更改，一般采用在原工艺文件上扛改的方式。若改动较大时，可更换产品焊接工艺规程的某页或某几页接头焊接工艺卡。所有更改都必须对已发出的工艺文件同时更改，不得遗漏，并作更改记录，以保持焊接工艺文件的一致性。所有更改处应有标记及焊接工艺人员盖章，并注明更改日期，否则无效。

10.5　产品焊接试件

产品焊接试件是为了检验产品焊接接头的力学性能。产品焊接试件是压力容器等产品焊接质量控制系统中的一个控制环节。压力容器产品焊接试件应遵循 GB 150.4—2011《压力容器 第 4 部分：制造、检验和验收》、NB/T 47016—2011（JB/T 4744）《承压设备产品焊接试件的力学性能检验》（以下简称 NB/T 47016—2011）的规定。

压力容器产品焊接试件由生产车间负责制作，由检验部门确认。本控制环节有试件制备、试样加工和试验两个控制点[1]。通常只需制作纵缝产品焊接试件，当采用新材料、新焊接工艺制造锻焊压力容器产品或图样有规定时，应做鉴证环（即模拟环缝的焊接试件）。

10.5.1　试件的制备[9]

① 凡符合下列条件之一的、有 A 类纵向焊接接头的容器，应逐台制备产品焊接试件。

a. 盛装毒性为极度或高度危害介质的容器。

b. 低温容器。

c. 制造过程中，通过热处理改善或者恢复材料性能的钢制容器。

d. 设计文件要求制备产品焊接试件的容器。

② 一台容器制作多块试件的规定。

下列情况的容器每台容器需要制作多块产品焊接试件。

a. 当一台压力容器上不同的壳体纵向焊接接头（含封头、管箱、筒体上的焊接接头）焊接工艺评定覆盖范围不同时（包括不同焊后热处理），应对应不同的纵向焊接接头，按相

应的焊接工艺分别焊制试件。

b. 热套压力容器的内外筒材料不同时，应各制作一块产品焊接试件。

c. 层板包扎压力容器应分别制作内筒焊接试件和层板焊接试件。

d. 现场组焊球形储罐应制作立、横、平加仰三块不同焊接位置的产品焊接试件。

③ 制备产品焊接试件的要求。

a. 用与所制容器用材同钢号、同厚度、同热处理状态的材料制作产品焊接试件。试件的坡口形式、尺寸和加工方法均应与产品一致。试件除应有钢材标记移植以外，还应有工作令号或容器编号、焊工钢印、监检员钢印等识别标记。

b. 焊接试件应由施焊该容器的持证焊工施焊，施焊时采用与施焊容器同样的条件和焊接工艺焊接。多名焊工焊接的容器，施焊焊接试件的焊工由制造单位的检验部门指定。焊后应在试件上打上焊工钢印。

c. 圆筒形容器的产品焊接试件，应在筒节的纵向焊缝的延长部位与筒节同时施焊[9,11]。

d. 有焊后热处理要求的容器，试件一般随容器一起进行热处理[11]。

e. 产品焊接试件经外观检查合格后，由检查部门通知监检单位现场确认，监检员在试件上打上钢印后，方可在筒节纵缝延长部位将试件分离。

10.5.2 试件与试样制备和试验

(1) 承压设备的焊接试件与试样制备和试验依据

焊接试件与试样的制备和试验要求按 NB/T 47016—2011 的规定执行。

(2) 试件尺寸和试样的截取、试样的类别和数量

试件尺寸和试样的截取、试样的类别和数量按 NB/T 47016—2011 第 5 章的规定执行。

(3) 验收指标

① 拉伸、弯曲和冲击试验方法及合格指标按 NB/T 47016—2011 第 6 章的规定执行。

② 产品焊接试件的拉伸、弯曲不合格，允许对不合格项目取原试样数量的 2 倍试样进行复验[11]。

③ 冲击试验不合格允许再取一组（3 个）试样进行试验。合格指标为前后 6 个试样的冲击功平均值不低于规定值，允许有 2 个试样小于规定值，但其中小于规定值 70% 的只允许有一个。若在冲击缺口断口存在无损检测允许的未超标缺陷而导致冲击功不合格，则该试样作废，允许重新试验[12]。

若某项试验不合格的原因是由于试验条件不佳或操作不当造成的，则该项试验作废，允许重新试验[12]。

复验结果仍然达不到要求，则应分析原因，采取相应措施（如热处理等），然后按上述要求重新试验[11]。

复验结果不合格，则产品被判为不合格。

(4) 奥氏体不锈钢制的低温容器的焊接试件值得注意的问题

① 冲击试验温度。当设计文件或相关技术文件没有规定时，不高于承压设备的最低设计金属温度（GB 150.4—2011 的 7.2.3 规定：当设计温度低于－192℃时，其冲击试验温度取－192℃）。

② 冲击吸收功 KV_2 验收指标。NB/T 47014—2011 规定对奥氏体不锈钢的低温焊缝冲击试验 3 个标准试样的冲击功 KV_2，应符合设计文件或相关技术文件的规定，且不应低于 31J，至多允许有一个试样的冲击吸收功低于规定值，但不得低于规定值的 70%；铬镍奥氏体钢试样还应提供侧向膨胀量（有关专家经过试验研究认为冲击吸收能量为 31J 时，侧向膨胀量约为 0.52mm）。

宽度为 7.5mm、5mm 的小尺寸冲击试样的冲击功指标，分别为标准试样冲击功指标的 75%、50%。

10.6 产品施焊管理

产品施焊是产品焊接质量形成的阶段。焊工的技能、焊接材料的性能、焊接设备的能力、焊接工艺评定的保证作用与焊接工艺的指导作用，都在产品施焊这一阶段里发挥出来。产品施焊管理这一控制环节包括焊接环境、焊接工艺纪律、施焊过程等控制点[1]。

10.6.1 制造环境[8]

① 不锈钢产品应有独立、封闭的生产车间或专用场地，应与碳钢制产品严格隔离。不锈钢产品如附有碳钢零部件，其碳钢零部件的制造场地应与不锈钢件分开。

② 为了防止铁离子和其他有害杂质的污染，不锈钢产品生产场地必须保持清洁、干燥、地面应铺设橡胶或木质垫板。零部件半成品、成品的堆放需配有木质堆放架。

③ 不锈钢产品在制造过程中应使用专用滚轮架（如滚轮衬有橡胶等）、吊夹具及其他工艺设备。起吊容器或零部件的吊缆宜采用绳制吊缆或柔性材料（橡胶、塑料等）铠装的金属吊缆。进入生产现场的人员应穿着鞋底不带有铁钉等尖锐异物的工作鞋。

④ 不锈钢材料或零部件在周转和运输过程中，应配备必要的防铁离子污染和磕划伤的运送工具。

⑤ 不锈钢产品的表面处理应有独立且配备必要的环境保护措施的场地。

10.6.2 加工成形过程的质量控制

不锈钢零件在加工时，应对下列过程进行质量控制。

① 不锈钢下料时，应将不锈钢移至专用场地下料，严禁在不锈钢材料垛上直接热切割下料。下料过程中不锈钢材料表面严禁用针划线和打样冲眼，不允许存在任何划伤痕迹[12]。

② 从下料件开始建立制造工序过程卡且填写标记移植号和检验确认号，转入零部件制造工序。

下料好的不锈钢材标记移植号要用无氯无硫的记号笔书写，不得打钢印。下料后多余钢材同样也要进行移植标记，存放在指定地点，避免材料混淆[12]。

③ 不锈钢板下料最好采用机械加工的方法，也可以进行等离子弧切割。

不锈钢板卷圆时，卷板机要用无铁离子的材料覆盖轧辊表面，避免钢材表面受污染。

④ 经热加工成形的奥氏体不锈钢封头、弯管、锻件等零部件，凡有耐晶间腐蚀要求的，均需采取固溶处理或稳定化处理等措施，以提高耐蚀性能[12]。

10.6.3 焊接环境

GB 150—2011 和 NB/T 47015—2011（JB/T 4709）两标准都对焊接环境提出了几乎完全相同的要求。综合起来就是下列要求。

① 风速的限制。气体保护焊，风速应小于 2m/s，其他焊接方法风速不应大于 10m/s（球罐焊接时按 GB 12337 标准 8.3.1 条规定为不应大于 8m/s）。除非是有可靠的遮挡防风措施，使焊接处的风速降至规定值以下，否则就不能保证焊接质量。

② 相对湿度不得大于 90%，不得有雨雪影响。

③ 气温不得过低　当焊件温度低于－20℃时不能够焊接，当焊件温度为－20～0℃时，应在始焊处 100mm 范围内预热到 15℃上。

④ 除标准的规定以外，实际生产时焊接环境还应满足下面的要求。

a. 焊接环境必须符合安全卫生要求。焊接时必须保证焊工安全。若安全没有保障，焊工无法安心施焊，焊接质量也必然无法保证。主要是：防触电、防火、防碰撞和防高处摔下，对焊工来说，还应特别注意防护焊接烟尘和有害气体，防高温中暑。因此，应有通风、排烟、隔热的措施。

b. 焊工的工作环境应有足够的光线，夜间焊接或在容器内施焊应有足够的照明条件。

c. 焊接环境应与碳钢、低合金钢隔离或分隔，防止铁离子污染。

10.6.4 装配焊接质量的控制

装配质量与焊接质量的关系最为密切，起到决定性作用，应对下列过程进行质量控制。

① 大型容器和焊接构件如在焊接工艺装置上进行组装和焊接时，焊前应对焊接工艺装置进行检查，保证其可靠性、精确性和稳定性，鉴定合格后方可使用。经过试装才能正式组装。

② 壳体组装过程临时所需要的楔铁、垫板等与壳体表面接触的用具，应选用与壳体相适应的不锈钢材料。

严禁强力组装，组装过程中不得使用可能造成铁离子污染的工具。

③ 不锈钢待焊处施焊前要用丙酮或酒精将此处 50mm 范围内的油污等杂物清洗干净。采用等离子弧切割的坡口，坡口处应予打磨直至露出金属光泽。

④ 不锈钢产品的施焊，不允许用碳钢材质作为地线搭铁，应将地线搭铁紧固在焊件上，禁止用定位焊紧固[12]。

⑤ 定位焊后的组装件要测量尺寸的正确性，同时还要考虑到焊接过程中焊件的变形和收缩，二者均须控制在允许的范围内。焊接完毕，焊工在焊缝一侧指定部位写上焊工钢印编号，以示对焊接质量负责，并应作好记录，随制造工序卡进行流转，归档，以便查阅。

⑥ 不锈钢产品制造过程中，应避免尖锐、硬性物质擦伤、划伤其表面。如在容器内部焊接时，应采取铺设衬垫等保护措施，免除内表面受损。有抗晶间腐蚀要求的不锈钢焊接产品酸洗处理后，必须进行钝化处理。钝化后的不锈钢表面应用清水冲洗，呈中性溶液后擦干水迹。排放的酸洗液，应采取中和处理，达到国家有关允许排放的标准后，方可排放，不得污染水源。该工序所有质量情况均要记录到产品制造工序卡中[12]。

10.6.5 施焊过程

(1) 焊前

① 在施焊前，焊工应确认焊接环境符合要求。若不符合要求要采取弥补措施，使施焊局部环境符合要求。

② 在施焊前，焊工应熟悉焊接工艺，并检查焊接工艺的实施条件。若遇到因原定焊接材料缺货要以其他焊接材料代用、原定焊接方法因设备不足或有故障而改用其他焊接方法、原定焊接位置因故要改为其他位置等情况，应提早通知焊接工艺人员按正常手续在正式施焊前更改焊接工艺。

③ 在施焊前，焊工应检查设备、仪表、焊接夹具、焊剂垫等工艺装备是否正常。碳弧气刨、砂轮等工具是否齐备，压缩空气是否正常，水冷氩弧焊炬、水冷铜滑块或铜垫的冷却水是否正常，并预先要有停水停电停压缩空气的应急措施。

④ 施焊前，焊工应核对自己是否具有将要进行的焊接工作所要求的有效期内持证项目。若过期或超项，及时通知班组长或车间负责人换人上岗。

⑤ 施焊前，焊工应核对产品工程号、焊件编号、焊接接头编号与焊接工艺是否相符。

⑥ 施焊前，焊工应检查坡口形状尺寸是否符合要求，有无分层、缺肉等缺欠。坡口及其附近的油、水、锈等脏物是否已清除干净，焊件的质量是否合格，有无合格转出手续或标记。不符合要求不得做组对定位焊。坡口两侧 100mm 范围内还应刷上白垩粉浆等防飞溅涂料。

⑦ 施焊前，焊工应妥善连接焊钳、地线的电缆，防止断路、短路、打弧、接头接触不良发热等情况。焊接时，铜导线不得直接压在不锈钢焊件上，要用带不锈钢垫的螺丝夹子夹紧。

⑧ 焊接纵缝时，应备好引弧板和熄弧板。规定带产品焊接试件的应将试件点固在产品第一道纵缝的延长线上。

⑨ 施焊前，焊工应按规定手续领用焊接材料。核对焊接材料牌号、规格是否与焊接工艺规定相符，并检查焊条、焊剂的烘干质量。

⑩ 施焊前，焊件应按工艺要求预热；并应能保证在整个焊接过程中焊接处不低于要求的预热温度。

⑪ 施焊前，应做好通风排烟、隔热防烤及登高作业的安全装置和照明灯具的安装。

（2）施焊

① 焊工施焊应严格遵守焊接工艺，按工艺要求施焊，焊接材料不得用错用混，焊接电流、电弧电压、焊接速度等工艺参数应在工艺规定的范围内。工艺若规定每层不摆动多道焊的，不能单道摆动焊。如工艺规定 50mm 宽度内堆焊焊道不得少于 8 道，每根焊条的焊道长度应为所用焊条长度的 0.8 倍，施焊时焊工必须严格执行此工艺规定。焊接检查员和焊接工艺人员应经常检查焊工执行工艺纪律情况和持证上岗情况，对不遵守工艺纪律和超项超期上岗者应予以制止。检查情况应记入施焊检查记录。

② 施焊时应按规定领退焊接材料，领到现场使用的焊条应装在保温防潮的焊条筒内，每次领出的焊接材料使用时间不得超过 4h，到时应将剩下的焊接材料送回焊接材料库重新烘干，并交回焊条头。

③ 产品规定做焊接试件时，负责焊接纵缝的焊工（多人操作时，为检查部门指定的焊工）应把产品焊接试件的焊缝视为纵缝的延长部位，用同样的方法、同批号的焊接材料、同样的焊接工艺参数与第一道纵缝同时焊好。

④ 焊接时，应逐层认真清渣，清除坡口边缘的飞溅，逐层仔细检查各层表面有无焊接缺欠。焊接接近坡口顶部时，应注意使填充金属的表面尽量齐平，使留下的坡口深度尽量均匀一致并适合焊表面层，以使焊表面时能更好地控制余高。

⑤ 施焊时应控制道间温度不高于工艺规定值 50℃，若道间温度过高，可以采用多条焊缝轮流焊接的方式，使之有足够的冷却时间。若道间温度过低时，应连续用预热装置加热。

⑥ 长焊缝、厚板焊缝在焊接同一焊缝时，应做好交接班工作。交班者应向接班者介绍本班的焊接情况，发生过什么事情，如何处理过，本班的工作进度及接班后应注意事情。作好交接班记录。

⑦ 若多人多班次焊接同一焊缝，应做好交接班工作。交班者应向接班者介绍本班的焊接情况，发生过什么事情，如何处理过，本班的工作进度及接班后应注意事情，并作好交接班记录。

⑧ 施焊中应对焊工的安全防护条件作监护，特别是高空作业、容器内作业、易燃易爆区内作业更应特别注意，使焊工解除对安全条件的后顾之忧，在最佳工作状态下施焊，保证焊接质量。

（3）焊后

① 有后热要求时，除焊后立即作焊后热处理以外，焊完最后一道焊缝后马上按规定作

后热。焊后焊工应认真清理焊渣和飞溅，认真作外观质量自检。发现咬边、焊缝与母材过渡不圆滑等表面缺欠或缺陷，应用砂轮修磨或进行补焊。

② 焊工应按规定用记号笔写上焊工钢印代号。纵缝应写在焊缝中部离焊缝边缘 50mm 处。若里外口由不同焊工焊接，则外口焊工钢印编号写在上面，里口焊工钢印编号写在下面，上下面以钢印字码方向为准。

环缝应写在距离焊缝边缘 50mm 左右处。

角接头应写在接管的中心线焊缝边缘外 50mm 壳体处。

不锈钢容器应按规定画出产品的焊缝位置图，在图上详细标记焊工钢印编号，存档备查。

③ 不锈钢容器焊接试件须经质量技术部门监检人员核查产品焊接试件并认可以后，方可将试件取下。取下试件、引弧板、熄弧板时，不得强行打下，应该用等离子切割等方法割下，并不得损伤焊件和焊缝。

④ 焊接检查员应作焊缝外观检查，并记入焊接检查记录。检查合格后才允许作无损检测及焊后热处理等后序工作。

10.6.6 焊接工艺纪律

焊接工艺是产品施焊的指导性文件，它是焊接工艺人员依据有关标准运用专业知识、总结本单位的经验，根据具体产品的要求制订，而且是经过焊接工艺评定合格的。严格遵循焊接工艺施焊，焊接接头的性能就可保证满足需要，质量可达到要求。在焊接施工中要特别强调遵守工艺纪律，所有的焊工都严格执行焊接工艺，产品的焊接接头才能达到标准的要求。

(1) 焊接工艺的贯彻

① 焊接工艺文件的发放。制造单位的焊接工艺人员编制的工艺文件经焊接责任工程师审核后，应在产品投产之前发至施焊的车间和焊接检查员，让有关人员能方便地查看焊接工艺、了解焊接工艺，对工艺中不清楚的地方应及时询问。

② 焊接工艺技术交底。新投产的产品或焊工首次焊制的产品，车间焊接工艺员应组织负责此产品焊接的焊工学习焊接工艺，掌握焊接工艺的要点。

新材料、新方法首次应用时，或较复杂新产品首次制造时，编制该工艺的焊接工艺员应向参加施焊的所有焊工详细宣讲焊接工艺，作技术交底，讲解新材料的性能、新方法的特点、新产品的要求等有关知识，并详细讲述各焊接工艺因素对焊接接头性能的影响、焊接工艺各参数选择的依据、焊接时容易出现什么缺欠、应如何防止、焊接过程中遇到问题应如何处理等工艺细节和有关技术标准、产品技术条件的要求、难点、要点及解决的措施，并回答焊工有疑问或不清楚的问题。

焊接工艺贯彻要使所有参加施焊的焊工对工艺有透彻的了解和理解，知道施焊时应该怎么做，而且也知道为什么这样做，以使焊工自觉地执行工艺，遵守焊接工艺纪律。

产品施焊时，焊工应将该产品的焊接工艺带至施焊现场，以指导生产。

(2) 焊接工艺纪律的检查

焊工在施焊时，应自查自己的焊接工作是否遵守工艺纪律，并在“施焊记录”中详细登记。

焊工班组长和车间焊接技术人员应经常检查焊工的施焊情况是否符合工艺规定，做好互检。

焊接检查员应经常到焊接现场检查焊工施焊情况，核对实际焊接的条件是否符合工艺的规定，所用的焊接材料、工艺参数与工艺规定的是否一致，并记载在“焊接检查记录”中。

焊接责任工程师、焊接工艺人员、检查员、班组长及车间领导均有权禁止任何违反工艺

纪律随便施焊的错误行为。

10.6.7　焊接检验与焊后表面处理

焊接检验分破坏性检验和非破坏性检验两种。

（1）破坏性检验

为了考核每台容器、锅炉或管路的焊缝金属的化学成分、金相组织、力学性能及耐晶间腐蚀性能，通常在容器、锅炉或管路施焊过程中带焊接试件，试件的材料牌号、炉（批）号、厚度与产品钢材一致。试件的焊接工艺与产品焊接时相同，焊接试件与焊接产品同时施焊，焊工和焊接设备仍与焊接产品时一样。这样做的目的是使它所处环境与正式产品一样，成为焊接产品的一个组成部分，用它来代表产品焊接接头的质量，用焊接试件所取得的各项数据代表产品焊接接头的真实情况。

破坏性检验包括下列内容。

① 焊接接头力学性能检验。包括焊接接头的拉伸试验、弯曲试验和硬度试验，必要时还需进行冲击吸收能量试验。

② 焊缝金属的化学成分分析。从焊缝金属中钻取样屑，进行化学分析，测定各元素含量。

③ 焊接接头金相组织检查。从焊接试件中截取焊缝及热影响区试样，借助于放大镜或显微镜检查该区域由于焊接过程热循环的影响而产生的金相组织变化。

④ 铁素体含量的测定。在奥氏体型不锈钢焊缝中含有一定数量的铁素体组织，能提高焊缝金属的抗裂性能和耐晶间腐蚀能力。但铁素体含量过多，也是有害的。控制铁素体在焊缝金属中的含量，可以避免焊缝金属在温度较高的工作条件下形成 σ 相组织，也可防止在非氧化性介质中的化学耐腐蚀性能降低。测定焊缝金属中铁素体含量，根据 GB/T 1954—2008《铬镍奥氏体不锈钢焊缝铁素体含量测量方法》进行。

⑤ 耐蚀性检验。为了确保奥氏体不锈钢焊接接头具有良好的耐蚀性能，按 GB/T 4334—2000《不锈钢耐腐蚀试验方法》的规定进行试验，试验合格后，将其结果填写在产品制造工序卡中流转，最后存档。

不锈钢耐腐蚀试验方法，由产品设计人员根据产品特性进行选用，且要在图样上注明。晶间腐蚀检查焊接产品使用工作温度低于 350℃的，焊接试样直接从焊后状态进行试验；若使用工作温度高于 350℃以上的，试样在焊后还要进行敏化处理。

（2）非破坏性检验

在不损坏焊接产品表面形状和保持焊接产品完整性的前提下，检测焊接接头外观和内部缺欠的方法称之为焊接接头非破坏性检验。其检查方法有下列几种。

① 焊件外观检验。它包括焊接构件的外形尺寸和焊接接头质量的检查。焊接构件外形尺寸检查要借助于量具、样板测量焊件焊后的真实尺寸。若超过设计图样规定的要求，要进行矫形、整形。焊接接头的检查，不允许焊缝存在裂纹、未焊透、咬边和焊瘤等缺欠；其他焊接缺欠如焊缝成形要控制在允许范围内。对于不允许存在的和超标的焊接缺欠，一定要按有关工艺文件进行修补。

② 焊接接头的无损检测。

a. 射线检测（RT）。采用 X 射线或 γ 射线照射焊接接头检查其内部缺欠的一种无损检验方法。它能准确地显示出焊缝中焊接缺欠的种类、形状、尺寸、位置和分布情况。锅炉压力容器压力管道射线检测按 JB/T 4730—2005《承压设备无损检测》进行。一般用途的不锈钢钢结构射线检测按 GB/T 3323—2005《金属熔化焊焊接接头射线照相》进行。

b. 超声检测（UT）。借助于超声波检测仪来检测焊缝内部缺欠的一种无损检测方法。

c. 渗透检测（PT）。采用带有荧光染料（荧光法）或红色染料（着色法）的渗透剂的渗透作用，来显示焊接接头表面微小开口缺欠的无损检验法。检测时要求被测表面平整光洁。此方法分为荧光检测和着色检测，其中荧光检测的测量精度较高。焊接构件表面检查常用着色法渗透检测。

d. 磁粉检测（MT）。利用在强磁场中，铁磁材料表层缺欠产生的漏磁场吸附磁粉的现象而进行的无损检验方法。在有缺欠处，由于漏磁的作用会集中吸附撒上的铁粉。可根据吸附铁粉的形状、厚度和多少，来判断焊接缺欠的位置和大小。该方法不适用于无磁性的奥氏体型不锈钢检测。

（3）表面处理的质量控制

焊后表面处理包括机械表面处理和化学表面处理两种。作为装饰品用的不锈钢产品，表面处理的目的是：使其表面平滑如镜，除去表面的污物，达到洁净卫生的要求，给人一种舒适的感觉，例如食品、医药等行业用不锈钢容器国家标准均要求焊后抛光处理；作为工业用品的另一类不锈钢产品，特别是化工容器经表面处理可使表面增加一层钝化层，有利于提高表面耐腐蚀能力。所以 HG/T 2806—2009《奥氏体不锈钢压力容器制造管理细则》标准提出了压力容器焊后应进行表面处理[12]。不锈钢焊接产品表面质量控制要求如下。

① 不锈钢焊接产品在进行表面处理之前，所有的焊接及焊后修补工作应全部结束。焊接产品表面的金属飞溅、熔渣、氧化皮、焊瘤、凹坑、油污等杂质均应清除干净。表面处理过程中不得使用碳钢刷清理不锈钢产品的表面。

② 机械表面处理即机械抛光，装饰品应用较多。抛光磨料一般选用氧化铝或氧化铬。每种抛光轮只能粘接一种粒度的磨料。抛光轮粘接磨料后应根据不同磨料严格控制烘干温度和烘干时间。抛光等级应按由粗到细的顺序逐级提高。粗抛后，应用十倍放大镜进行表面检查，如在局部区域发现小麻点，应将小麻点抛磨干净，且不允许有明显的凹坑后方可进行精抛。在整个抛光过程中，应始终控制抛光层表面温度，预防变形和过热。并应保持抛光纹路的一致性。抛光等级按 GB/T 1031—2009《产品几何技术规范（GPS）表面结构 轮廓法 表面粗糙度参数及其数值》的规定进行评定，并应符合设计图样的要求。

③ 采用电化学抛光或其他方法抛光时，应事先进行工艺试验，工件抛光应严格按照工艺要求进行。凡是具有抗腐蚀要求的奥氏体不锈钢及复合钢板焊接产品应进行酸洗、钝化处理[12]。酸洗、钝化应以浸蚀为主，亦可采用湿拖法或酸洗钝化膏剂涂抹处理。

④ 工件酸洗、钝化工艺参见附录 D。

10.7 焊接返修

焊接时，由于焊接环境、焊工（技能、疲劳程度、情绪）、焊接材料、钢材、焊接设备、焊接工艺执行情况、网络电压波动等原因，常会产生一些咬边、气孔、夹渣、未熔合或未焊透、裂纹等焊接缺欠。在外观检查或无损检测时发现不允许的缺欠或超过标准允许范围的缺欠，意味着焊接缺欠部位达不到所要求的性能和质量要求，就要进行焊接返修，通过返修消除缺欠，达到原定的性能和质量要求。焊接返修是焊接质量控制系统中的重要环节之一。加强焊接返修的管理，提高一次合格率和返修的成功率，确保产品质量是焊接质量控制的一项重要工作。焊接返修质量控制包括一次返修、二次返修、超次返修三个控制点[1]。

10.7.1 一次返修

（1）超标缺欠的确认和标记

无损检测人员在焊缝检测中，发现超标缺欠，经复评人员确认后，应填写“焊接接头修

通知单”，注明要返修的产品名称、图号、底片编号（要返修的部位）、缺欠性质及数量、缺欠累计长度、评定级别等，送至相关检验员和责任部门各一份。与此同时，无损检测人员应根据检测方法的不同，以不同的标记方式为车间提供返修工作依据。

① 射线检测应提供超标缺欠定位图。

② 超声检测应提供超声检测评定表。

③ 磁粉检测或渗透检测，应用不含氯、硫的记号笔在焊缝上对需返修的缺欠位置作出标记。

（2）一次返修的实施

一次返修时，由焊工班长会同车间（或施工队，下同）焊接技术人员与原焊缝的施焊焊工分析缺欠产生的原因，并制定切实可行的措施，经焊接责任工程师审核后，依据返修工艺进行返修，一般可由原焊工承担返修工作。当原焊缝是埋弧焊，需要用焊条电弧焊返修时，或原焊缝产生缺欠与焊工技能、疲劳程度、情绪有关时，可另派技能熟练且持有该项目合格证的焊工返修。

返修后应先由检查员作外观检查，确认合格后，在焊缝返修通知单上确认，并由车间将焊缝返修通知单和原底片或缺欠定位图、超声检测评定表送交无损检测人员，对返修后的焊接部位重新作无损检测。

10.7.2　二次返修

因为一次返修没彻底清除缺欠或在一次返修中出现新的缺欠，需要二次返修。缺欠的确认和标记缺欠的方法同一次焊接返修。

发生二次返修时，应认真对待，焊工班长应及时向焊接责任工程师报告，由焊接责任工程师组织焊工班长、焊工、焊接技术人员等有关人员分析一次返修不合格的原因，由焊工班长会同焊接技术人员提出书面返修方案交焊接责任工程师审核，经焊接责任工程师批准后依据返修工艺实施二次返修。

返修后重新无损检测程序同一次焊接返修。

10.7.3　超次返修

压力容器的焊接接头同一部位连续返修多于两次，称为超次返修。超次返修意味着原焊接缺欠较难彻底清除或返修焊接时仍然极易产生新的焊接缺欠；也反映出焊接质量管理、焊接工艺技术、焊接设备、焊工技能或焊接环境等方面中某个或某些环节仍有不能满足焊接质量要求的不完善之处未得到彻底改正，致使焊接缺欠反复出现。所以对待超次返修必须高度重视、谨慎处理。

无损检测人员发现焊缝经两次或多次返修仍不合格时，应按规定确认超标缺欠的性质、位置、大小、深浅并作出标记，填写焊缝返修通知单时应在“返修次数”栏上标明超次返修的次数，及时通知车间。车间技术负责人会同焊接责任工程师、焊接工艺人员、焊工班组长、参加过焊接和返修的焊工、检查员等有关人员认真分析产生超次返修的原因，制定包括如何彻底清除原缺欠和如何防止产生新缺欠的书面返修措施并填入“焊缝超次返修卡”，经车间技术负责人同意并签字以后，交焊接责任工程师审核签署意见，呈报企业技术总负责人批准。压力容器超次返修前还应由车间将超次返修卡送质量技术监督部门监检员签字确认后，再进行返修。车间技术负责人应指派车间焊接技术人员、焊接技师参加并指导超次返修，必要时请无损检测人员现场配合，并将缺欠情况、刨槽尺寸、所用焊接方法、焊接材料、预热情况、焊补规范及层次等记录在焊缝超次返修卡的“返修记录”栏上，焊工对记录核实后签字确认。返修后外观检查结果、无损检测结果分别由检查员和无损检测人员填入超

次返修卡栏中。返修次数、部位、返修结果和技术负责人批准字样应记入容器质量证明书中。

10.7.4 焊接返修应注意的事项

（1）缺欠产生的原因分析

分析时应注意比较缺欠的分布特点，注意同一缺欠集中出现的条件，如：缺欠集中在某一台产品上，其他产品没有或很少，则此台的焊接设备可能有问题；缺欠集中发生在使用某个批号焊条焊出的焊缝上，采用其他批号焊条焊的产品没发现缺欠，则该批号焊条可能有问题。

为了便于查找原因，必要时可以做些焊接试验，模拟特定条件下的焊接，检测或解剖有无缺欠。如在某产品 CO_2 气体保护焊时，发现了许多小气孔，怀疑是气体不纯引起的。用这瓶气体和另一瓶经严格倒置排水的气体在其他条件不变的情况下，分别焊两个角焊缝试件，打开看断口，比较气孔的多少，就可判别出是否因气体含水过多引起的。

（2）缺欠大小位置的确定及是否被清除的判定

有些焊接缺欠的大小及位置往往不易准确判定，以致返修时未彻底清除缺欠，导致二次返修甚至超次返修。此时可以用偏斜透照角度的办法再进行射线检测，通过与垂直透照结果的比较就可得知缺欠的深度，并可判别缺欠是否两层或多层重叠。还可以用射线检测后再补充超声检测，因为射线检测对裂纹缺欠不敏感，而超声检测对裂纹却很敏感。

清除缺欠时，要在缺欠的延长线上开始气刨或砂轮打磨，以防缺欠的实际长度比检测显示的大而清除不净，也有利于防止裂纹缺欠扩展。

气刨清除缺欠时，不应一次刨得过深，以免缺欠被除掉了还不知道。在接近无损检测确定的深度时，每次刨除深度应减到 1～2mm，边刨边观察，以发现缺欠，并对比检测结果的缺欠深度、大小、数量和位置，完全一致时，缺欠有可能被清除。清除完毕后，可用放大镜检查刨槽底部和侧壁，对于非奥氏体不锈钢还可用干磁粉检测，判断缺欠是否被清除。局部无损检测的焊缝应按规定扩探。

（3）防止产生新的焊接缺欠或接头性能下降的措施

① 返修焊接应有焊接工艺，而且应评定合格。如：原来用埋弧焊的焊缝出现了返修，采用焊条电弧焊返修，那么采用的焊条电弧焊工艺应是评定合格的。

② 清除裂纹缺欠时，要防止裂纹扩展，最好在裂纹两端用钻头钻出裂孔将应力释放掉。

③ 用碳弧气刨清理缺欠时，应防止渗铜、夹碳等缺欠，气刨后要用砂轮打磨刨槽，去除渗碳层，打磨厚度不应小于 1mm。

④ 当原焊工技能较差、较疲劳或情绪不好时，返修焊接可更换焊工。

⑤ 返修焊时可选用较好的焊机。

⑥ 返修焊接时，在不改变焊条牌号的前提下，可选用有优良性能的焊条，有利于改善焊缝性能和防止裂纹。采用这样的焊条不涉及重要因素和补加因素改变，焊接工艺不用重新评定。

⑦ 对于马氏体不锈钢和铁素体不锈钢焊接返修适当提高预热温度和道间温度，这有利于防止裂纹。道间温度升高应控制不超过原评定合格值 50℃，这样可不用增加补加因素的冲击试验。

⑧ 清除缺欠后还要将刨槽开得便于焊接，槽的长度一般不小于 80mm，槽的宽度应大于焊条直径的 2～3 倍，槽的两端与侧壁应有适当角度，底部应圆滑。

⑨ 焊接时，应尽量在稍有上坡的平焊位置，多道多层焊，注意各层起弧和收弧处尽量错开。逐层认真清渣并仔细作外观检查，确认无缺欠后再焊下一层。奥氏体不锈钢焊缝返修

时，尽量用直径较细的焊条，采用较小的线能量，并严格控制道间温度不大于 150℃，焊后焊缝正反面不得出现明显过热。

⑩ 焊接较厚的板或刚性较大的 T 形接头时，为防止裂纹，可采用逐层锤击法，减少焊接应力。

⑪ 对超次返修的不锈钢焊缝，可对返修部位内、外表面焊缝、熔合区及热影响区用铁素体测定仪测定各区铁素体含量，并与相应的未返修部位比较，若铁素体含量变化不大，而且返修部位没有明显的颜色变化，看不出过热迹象，则可认为其耐蚀性能无明显变化。

⑫ 所有返修部位都应按原要求经外观检查及无损检测合格。

⑬ 马氏体不锈钢焊接返修工作应在焊后热处理之前进行完毕。否则返修后应重新作热处理。焊接返修应在焊后立即进行，避免焊后应力过大产生裂纹。

⑭ 焊缝返修工作应在水压试验之前完成，若水压试验后由于焊接接头或接管泄漏而进行返修的，或返修深度大于 1/2 壁厚的压力容器，还应重新做压力试验。

10.7.5　提高焊缝无损检测一次合格率的质量管理活动

焊缝出现返修是常见的事，然而焊缝返修对产品的焊接质量、工期、材料和能消耗都有影响。返修过多，是影响产品制造单位经济效益的原因之一。为了提高质量，缩短工期，降低消耗，增加效益，企业开展提高焊缝无损检测一次合格率的质量管理活动是焊接质量持续改进的一项重要工作。该活动的开展方法如下。

① 提出提高焊缝无损检测一次合格率的质量目标。

② 制定奖惩制度，发动员工参加 QC 小组活动。

③ 运用质量管理工具，进行 PDCA 循环。

在 QC 小组活动中，集中群众的智慧经验，分析缺欠产生原因，在归纳大家的分析时，可由因果分析图（鱼刺图），从人、料、机、法、环等方面查找原因，作透彻的分析。

在分析原因的基础上，QC 小组可拟定有针对性的活动计划，制定措施，列出措施表，把具体措施、具体的工作任务、要求完成的时间、承担这项任务的具体人员都落实下来。

经过“P”（plan）阶段的“策划”以后，接着就是“D”（do）阶段的“实施”，“C”（check）阶段的“检查”，“A”阶段的“处置”，通过一个 PDCA 循环达到一个效果，一次合格率提高到一个新水平，又开始另一个新的 PDCA 循环，如此循环下去，问题逐个得到解决，一次合格率逐步得到提高（即持续改进）。

10.8　焊接设备管理

不锈钢焊接产品多数用在对腐蚀介质，高温强度和低温塑性等方面有特殊要求的重要场合。一旦焊接接头发生泄漏或断裂，其后果不堪设想。对于不锈钢产品的焊接，除了应提高焊工素质，严格控制焊接材料外，焊接设备的质量也要引起高度重视。在焊接产品加工过程中，焊接设备是保证产品质量的一个重要措施，它的质量在很大程度上决定焊接产品的优劣。焊接设备及相关设备包括：

① 焊接电源及其他机器；

② 接头制备及切割（包括热切割设备）；

③ 预热及焊后热处理设备（包括温度指示仪）；

④ 夹具及固定机具；

⑤ 用于焊接生产的起重及装夹设备；

⑥ 人员防护设备及直接与焊接有关的其他安全设备；

⑦ 用于焊接材料处理的烘干炉、保温桶；

⑧ 清理设施；

⑨ 破坏性试验及无损检验设备。

焊接设备管理是设备质量控制系统与焊接质量控制系统的交叉点。设备责任工程师应对焊接设备的管理负责，焊接责任工程师则在焊接设备的购置、调试、使用和改进方面予以协助。

焊接设备控制环节有焊接设备完好状态管理和焊接仪表周检两个控制点[1]。

10.8.1 焊接设备完好状态管理

（1）焊接设备的购置

企业的设备管理部门（或设备处）根据年度设备更新改造计划和技术改造计划拟定焊接设备购置年度计划。焊接责任工程师在年度焊接设备更新改造计划和技术改造计划中提出焊接设备购买方面的建议与意见，供设备责任工程师参考，使购买的焊接设备技术先进，生产适用，价格合适、容易维护。

（2）焊接设备的验收

新焊接设备进厂后，按照合同、说明书和有关技术资料，由设备管理部门（或设备处）组织合同签订人、设备员、保管员、焊接工程技术人员共同验收。由设备员填写“设备开箱单”，并与有关资料一并由设备管理部门存查。

（3）焊接设备的安装

安装前，由安装单位有关人员学习新设备有关资料，了解性能及安全要求、安装中所用机具、工具和注意事项等，并编制安装施工方案，据此进行安装，安装后试运转，将设备运转试验记录单交付设备管理部门存查。

（4）焊接设备的调试与交付

调试工作由设备责任工程师、焊接设备安装施工单位、使用单位、设备管理部门、焊接责任人员参加，分空载调试和负载调试，调试验收内容按说明书要求进行。焊机主要试验空载电压，最大最小焊接电流，最大最小焊接速度，电弧稳定性，电流电压调节灵活性，按钮、旋钮、指示灯、保险装置的可靠性等。调试可靠后，由安装单位填写“设备安装移交验收单”，使用单位和设备管理部门签字存查。

（5）焊接设备维护与保养

使用单位应指定焊接设备定人定机、专管专用，焊工通过培训，要达到四懂：懂设备性能、懂结构、懂使用、懂防护措施；四会：会使用、会保养、会检查、会排除故障；并负责每日的例行保养和每月的一级保养。设备管理部门下达二级保养计划，并监督车间实施。

保养内容主要是清除焊机的尘土、油垢等脏物，保持焊机绝缘良好，导线接触良好，润滑良好，调节灵活，运转正常，仪表显示准确。

（6）焊接设备故障与事故的处理

焊工发现焊机有异常声响，温度升高、有烧胶皮的气味等故障征兆时，应及时停电关机向车间负责人报告，交有关方面处理。一般故障由车间管理人员组织焊工分析查找原因排除故障，不易排除的故障由设备管理部门派员参加分析处理。

焊接设备的重大事故由车间填报“设备事故报告表”，由设备管理部门主持事故分析会，并组织事故处理。一般设备事故由车间负责分析处理。

（7）焊接设备完好状态检查及标识

设备管理应会同车间负责人、设备操作人每月定期对重点焊接设备作完好状态检查，测定设备主要性能参数，检查例保、一保、二保的效果，发现存在问题，每年作一次年度鉴

定，提出处理意见，认真填写“设备完好检测记录”和设备完好率统计台账，并由车间负责人、设备管理员、操作者、设备责任工程师会签。

焊接设备分完好设备、停封设备、报废设备、闲置设备，分别挂牌标识。

(8) 焊接设备完好情况统计

车间应详细填写“设备明细及定人定机表”，把焊接设备的定人定机、专管专用情况落实并上报。

10.8.2　焊接设备仪表的计量周期检定

与焊接有关的仪表是焊机的电流表、电压表、气体流量计、压力表，烘干设备的控温仪、定时仪，试验室用的扩散氢测定仪、天平、表面温度计、铁素体含量测定仪、便携式里氏硬度计等，这些仪表按规定要每年至少检定一次，要由质量技术监督部门发证的计量检定单位检定，以确保仪表的精确性。

10.9　质量手册和程序文件的相关内容

焊接质量控制系统是质量控制系统中很重要的一部分，因而在质量体系的质量手册、质量体系程序文件、其他支持性文件三个层次上都有许多直接或间接与焊接质量控制有关的内容。

10.9.1　质量手册的相关内容

质量手册的第一个内容就是企业的质量方针，它是生产单位最高管理者正式发布的本单位总的质量宗旨和质量方向。这当然也是焊接系统的组织机构所有人员的质量宗旨和质量方向，焊接质量控制系统的所有质量活动，都是以实现此质量方针为根本目的的。

质量手册的第二个内容就是确定企业的组织机构，规定企业内各系统包括焊接质量控制系统各级工作人员的职责、权限和相互关系。

质量手册规定了各级部门各责任人员的职责、权限和相互关系，使各部门能各负其责，明确分工，互相配合，协调工作，使整个焊接质控系统能有效地运转，发挥作用。

质量手册的第三个内容就是质量体系程序的概略说明，其中对焊接质量控制系统的主要控制环节，如：焊工管理、焊接材料管理、焊接设备管理、焊接工艺评定、焊接工艺文件、产品施焊、产品试件、焊缝返修等也作出了纲领性的概述。

10.9.2　质量体系程序文件的相关内容

程序文件就是质量控制的某项活动的目的、范围和做法（包括何时、何地、由谁、做什么、怎么做）。管理性程序文件通常也称管理标准，焊接质量控制系统的主要程序有：焊工培训、考试及持证上岗管理规定，焊工档案管理规定，焊接工艺评定管理规定，焊接工艺文件规定，焊接工艺纪律规定，焊接工装管理规定，焊接环境管理规定，产品焊接试件管理规定，焊缝返修管理规定，焊接材料管理规定，焊接设备维护保养管理规定，焊接仪表周检管理规定，焊接安全管理规定等。

这些程序文件有可操作性和可检查性，是焊接质量控制实施中必须遵循的具有约束力的文件，也是与焊接质量有关的管理工作、技术工作和有关人员岗位责任的依据。

10.9.3　其他支持性文件的相关内容

其他支持性文件指的是用以指导焊接中的某个具体过程、描述某些技术细节的具有可操

作性的文件。许多“作业指导书”之类的文件就属于这一类型。低温钢焊接工艺守则，奥氏体不锈钢焊接工艺守则，铁素体不锈钢焊接工艺守则，不锈钢复合钢焊接工艺守则，焊条电弧焊工艺守则，埋弧焊工艺守则，钨极氩弧焊工艺守则，CO_2 气体保护焊工艺守则，碳弧气刨操作规程，焊缝清根办法及质量要求，换热管与管板焊接工艺守则，焊接工艺评定实施细则，焊接工艺评定报告、焊接工艺指导书及接头焊接工艺卡编号规定；焊接责任工程师岗位责任制，焊接试验室主任岗位责任制，焊接试验人员岗位责任制，焊接工艺人员岗位责任制，焊工考试委员会主任岗位责任制，焊工教师岗位责任制，焊接材料保管员岗位责任制等。这些支持性文件由焊接工艺人员或有关人员编制，由焊接责任工程师审核，在具体工作中应贯彻落实这些规定，并及时反馈意见，总结经验，不断丰富完善。

10.9.4 焊接质量控制系统质控表的应用

为了提高焊接的质量管理水平，确保产品质量，各生产单位应编制一套满足质量要求的焊接质量控制表。

10.10 产品设计结构

不锈钢焊接产品与其他产品不同，有其自身的特点，为了防止焊接产品在服役运行过程中发生脆断事故，要求产品设计图样尽量减少焊缝的应力集中；不采用搭接接头和角接接头为受力焊缝；尽量不采用交叉焊接接头；同样对焊接接头质量也有较高的要求，重要的不锈钢焊接产品焊缝内部不允许存在裂纹、未焊透、未熔合等线性缺欠。

焊接产品的设计图样要能满足焊工的可焊到性，使每个焊工都有一个理想的空间从事施焊。这样不仅有利于焊工作业，更重要的是为获得优良焊接接头质量创造出一个环境。除了有良好的可焊到性，还要满足可检测性，使检查焊接接头的仪器（或设备），有一定的存放空间，这样才能全面了解、检测焊接接头质量的全过程，有利于最终对焊接接头质量的正确评估。

为了节省焊接材料，对坡口形式可采取下列措施，在保证焊透的情况下，坡口开的角度要小些，钝边高度留得高些；能采用双面坡口时，尽量不采用单面坡口；可以采用 U 形坡口，不用 V 形坡口。这样做不仅为了节省焊接材料，同时也可以减轻焊工劳动强度，有利于提高劳动生产效率。

总之，设计图样和工艺的正确性，对控制焊接产品制造过程的质量起到一个技术保证作用。

附 录

附录 A 关于承压设备在执行 NB/T 47014—2011 前完成的焊接工艺评定其有效性的确认

（参考性资料）

1. 在 NB/T 47014—2011《关于执行＜承压设备焊接工艺评定》实施日期之前完成的焊接工艺评定的资料[包括材料质量证明书、焊接检验记录或施焊记录、无损检测报告（需要作无损检测的必须有无损检测报告）、热处理报告及热处理自动的记录曲线图（需要热处理的必须提供热处理报告和热处理自动记录曲线图）、理化报告等]须齐全，试样的规格、弯曲试样的弯曲角度和试样数量等应符合原评定标准的要求，否则判为无效。

2. 所有继续有效的焊评报告其母材类别、组别、焊接材料型号、母材厚度及焊缝金属厚度的适用范围须按 NB/T 47014—2011 的规定重新确定，且所有的焊接工艺评定报告均须按本章的附录 B 的格式重新填写报告的附加页，报告的编制人、审核人、批准人按现有质量保证体系人员的职责进行签署，签署后装入原报告中。继续有效的焊评报告封面和试样标牌要注明“按质检特函〔2011〕102 号文件判为有效”的字样。

3. 已评定合格的热处理焊接工艺评定项目须按其热处理报告及曲线图记录的保温时间重新确定母材厚度、焊缝金属厚度适用范围。

低于下转变温度的焊后热处理焊接工艺评定，焊评确定的最厚焊缝金属厚度所需的热处理（最短）保温时间，是否满足 NB/T 47014—2011 标准 6.1.4 条的规定。

注：工件热处理最少保温时间按 NB/T 47015—2011《压力容器焊接规程》表 5 规定的计算。

4. 按《蒸汽锅炉安全技术监察规程》附录Ⅰ评定合格的焊接工艺评定项目确认意见如下。

（1）焊接工艺评定项目如已进行了冲击试验，且冲击功符合 NB/T 47014—2011 的规定可以用于支持电力锅炉、工业锅炉等产品的焊接工艺。

（2）继续有效的焊接工艺评定项目如未进行冲击试验，只适用于工业锅炉产品的焊接工艺。

5. 按 JB/T 4708—2000《钢制压力容器焊接工艺评定》评定合格的焊接工艺评定项目确认意见如下。

按《钢制压力容器焊接工艺评定》（JB/T 4708—2000）评定合格的焊接工艺评定项目，如已进行了常温冲击试验，且冲击功符合 NB/T 47014—2011 的规定，可以用于支持设计不低于 0℃的压力容器产品的焊接工艺，亦可用于支持电力锅炉、工业锅炉产品的焊接工艺。

6. 焊接工艺规程（焊接工艺指导书）的有效性确定与识别

（1）在 NB/T 47014—2011 实施之前制订的焊接工艺规程，如后续产品焊接时预继续使用原有的焊接工艺规程时，则应在产品施焊之前对相应焊接工艺规程进行复审，以确定所引用的焊接工艺评定报告是否适用。凡经复审确定引用的焊评不适用的，应重新引用焊评报告或按 NB/T47014—2011 标准对焊接工艺重新评定。

（2）对原有的焊接工艺规程复审确认为有效的文件（含按 NB/T 47014—2011 完善的焊接工艺），在原“焊接工艺规程封面”明显的位置增加“焊接工艺指导书”字样。

7. 重叠的焊接工艺评定、型式试验焊接工艺评定其报告和试样要妥善保管暂停使用，试样保存在焊评试样柜内，并在标签上注明“暂停使用”，在焊接工艺评定一览表内注明“暂停使用”。

8. 重新编制焊接工艺评定一览表（参见附录C），并发至有关部门。

附录B 承压设备焊接工艺评定报告转化确认

（参考性资料）

单位名称： 表××-××

焊接工艺评定报告				PQR No.	
焊接方法		原评定标准			
热处理类别		热处理温度及保温时间			
冲击试验温度		焊接位置			
焊接材料				母材	
焊材型号				母材牌号	
焊材牌号				类别、组别号	
类别、组别				厚度	
焊剂类别				直径	
有效性确认及适用范围	按“质检特函〔2011〕102号”文件和NB/T 47014—2011《承压设备焊接工艺评定》标准的规定，确定该焊评报告及试样合格有效，其适用范围如下： 适用焊缝金属种类： 适用焊缝金属厚度范围： 适用母材种类： 适用母材厚度范围： 适用产品热处理类别： 适用产品的最低设计温度： 最大线能量： 电源极性： 焊接位置：				
	确认人及日期				
编制人	审核人	批准人	监检员	第三方	用户

附录C 焊接工艺评定一览表

（资料性附录）

××××厂（公司） 表××-××

焊接工艺评定项目一览表

序号	焊评编号	接头简图	焊接方法	母材牌号	焊材牌号	焊后热处理（℃×h）	适用范围
							适用焊缝金属种类： 适用焊缝金属厚度范围： 适用母材种类： 适用母材厚度范围： 适用产品热处理类别： 适用产品的最低设计温度： 最大线能量： 焊接位置：
							适用焊缝金属种类： 适用焊缝金属厚度范围： 适用母材种类： 适用母材厚度范围： 适用产品热处理类别： 适用产品的最低设计温度： 最大线能量： 焊接位置：

批准： 年 月 日 审核： 年 月 日 编制： 年 月 日

附录 D 不锈钢产品酸洗钝化工艺
（参考性资料）

D.1 酸洗与钝化处理工艺

D.1.1 酸洗与钝化处理程序

酸洗与钝化处理程序：除油污→酸洗→钝化→水洗→干燥等。

D.1.2 总则

a. 工件在酸洗、钝化前须进行工艺试验，制定出适宜的配方和操作工艺（含安全操作规程）。酸洗液、钝化液应定期取样化验，及时校正浓度。

b. 酸洗前，不锈钢零件的表面质量应满足 GB/T 12611《金属零（部）件镀覆前质量控制技术要求》的规定。

c. 凡不锈钢压力容器上有碳钢零部件的，在酸洗过程中应采取有效措施，不能使碳钢件遭到腐蚀。

d. 酸洗、钝化应以浸蚀为主，亦可采用湿拖法或酸洗钝化膏剂涂抹法。

D.1.3 除油污

不锈钢零件在酸洗或钝化之前应彻底除去油污及其他外来物（检查方法与要求：将水洒在基体表面上，表面会呈现均匀而连续的水膜，水膜至少保持 30s 不破裂，且表面无任何其他对零件质量有损害的异物或残留物）。清洗方法可采用汽油、碱液或净洗剂除去油污，并用水冲洗干净，不允许用碳钢丝刷洗刷工件表面。

D.1.4 酸洗

通常处理时要经过松动氧化皮→浸蚀→去除浸蚀残渣等几个步骤，操作人员在操作时，必须穿好耐酸服（工作服应符合 GB 24539—2009《防护服装 化学防护服通用技术要求》，GB 24540—2009《防护服装 酸碱类化学品防护服》的要求），带好手套，口罩与防护眼罩。在容器内酸洗时必须带上检查合格的防毒面具，并在专人监护下进行。酸洗工艺要求如下。

a. 松动氧化皮：溶液中含浓度为 66% 的硝酸 80～120g/L，溶液温度为室温，处理时间小于 60min。

b. 侵蚀：溶液中含浓度为 98% 的硫酸 200～250g/L，浓度为 36% 的盐酸 80～120g/L，溶液温度为 40～60℃，时间至氧化皮除尽为止。

c. 除去侵蚀残渣：溶液中含浓度为 66% 的硝酸 30～50g/L，浓度为 30% 的双氧水 5～15g/L，溶液温度为室温，处理时间为 10～60s。

注：酸洗也可采用酸洗膏，酸洗膏配方（供参考）：盐酸（相对密度 1.19）20mL，水 100mL，硝酸（相对密度 1.42）30mL，膨润土 150g。酸洗膏酸洗主要适用于大型容器或局部处理。在室温下将酸洗膏均匀涂在干净设备上（2～3mm 厚），停留一小时后用洁净水或不锈钢丝刷轻轻刷，直至呈现出均匀的白色酸蚀的光洁面为止。

酸洗后的不锈钢表面不得有明显的腐蚀液迹，不得有颜色不均匀的斑纹，焊缝及热加工表面不得有氧化色，且酸洗后须用洁净的水冲洗干净，不得有残留酸洗液。

D.1.5 钝化

由于金属表面在腐蚀过程中生成的腐蚀产物（不锈钢的腐蚀产物中主要含有 Cr_2O_3）很致密且能牢固地附着于金属表面，阻滞了腐蚀过程，出现了腐蚀速度降低的现象，叫做钝化。

用钝化溶液处理零件、部件或成品时被处理件应完全浸没在钝化处理液中，以防止液面以上的部分发生严重腐蚀。钝化处理溶液配方见附表 1。

附表 1　钝化处理工艺

配方编号	钝化处理溶液	适用的不锈钢牌号
1	溶液中含浓度为 66% 的硝酸 25%～45%(体积比)，溶液温度 21～32℃，处理时间 30min	12Cr17Mn6Ni5N、12Cr18Mn9Ni5N、1Cr18Ni7、12Cr18Ni9、06Cr19Ni10、022Cr19Ni10、06Cr19Ni10N、10Cr18Ni12、0Cr17Ni12、06Cr17Ni12Mo2N、06Cr18Ni11Ti、0Cr18Ni11Nb、0Cr18Ni9Ti
2	溶液中含浓度为 66% 的硝酸 20%～25%(体积比)，溶液温度 49～60℃，处理时间 30min	

注：不锈钢钝化也可采用钝化膏，钝化膏配方（供参考）：硝酸（浓度 67%）30mL，重铬酸钾 4g，加膨润土（100～200 目）搅拌至糊状。钝化膏主要适用于大型容器或局部处理，在室温下将钝化膏均匀涂在酸洗过的容器表面（2～3mm），1h 后检查，直至表面生成均匀的钝化膜为止。

D. 1. 6　水洗与干燥

钝化后的不锈钢从钝化溶液中取出后应立即彻底清洗，呈中性后擦干水迹或用热风吹干。如果需要可在第一道水洗后增加稀碱中和工序，以除去复杂腔体内的残留酸液。水的氯离子含量不得高于 25mg/L。

D. 2　记录

操作者应对酸洗、钝化处理的主要过程参数进行记录，并保存好记录数据，记录至少保存 7 年。

D. 3　酸洗、钝化后检验

D. 3. 1　钝化膜的检查

有抗晶间腐蚀要求的不锈钢压力容器表面处理后，应避免在介质接触面进行钝化膜检查。钝化膜的检查应按设计图样的规定进行，若设计图样无规定，则按蓝点法进行检查（采用 1g 赤血盐＋3mL 65%～85%硝酸＋100mL 水配制溶液，用滤纸浸渍溶液后，贴附于待测表面或直接将溶液涂刷于待测表面，如表面钝化膜不完整或者有铁离子污染，即呈蓝色），30s 内显现蓝点为不合格。

D. 3. 2　色泽要求

a. 经机械加工的零件酸洗后应保持不锈钢原有的色泽。

b. 经热处理的零件酸洗后因材料成分不同表面应为无光的浅灰色至深灰色。

c. 酸洗后化学钝化的零件表面为略带黄色的灰色。

D. 3. 3　不允许的缺陷

a. 酸洗或钝化后零件表面有残余的氧化物、机械杂质、污物等。

b. 有钝化要求的部位未钝化上。

c. 零件受到过腐蚀。

d. 零件干燥不彻底，有残余水分。

e. 同一零件的主要表面上有严重的色泽差异。

D. 3. 4　钝化膜的检查记录

至少保存 7 年。

D. 4　酸洗液、钝化液的排放

需排放的酸洗液应采取中和措施，达到国家废水排放标准后方可排放。

参 考 文 献

[1] 辽宁省锅炉压力容器特种设备安全技术协会编．压力容器制造质量控制．2010.
[2] TSG Z6002—2010. 特种设备焊接操作人员考核细则．
[3] JB/T 3223—1996. 焊接材料质量管理规程．
[4] NB/T 47014—2011（JB/T 4708）．承压设备焊接工艺评定．
[5] HG/T 20584—2011. 钢制化工容器制造技术要求．
[6] 国质检锅［2003］194 号．锅炉压力容器制造许可条件．
[7] NB/T 47015—2011（JB/T 4709）．压力容器焊接规程．
[8] TSG R0004—2009. 固定式压力容器安全技术监察规程．
[9] GB 150—2011. 压力容器．
[10] TSG R0004—2009.《固定式压力容器安全技术监察规程》释义．
[11] NB/T 47016—2011（JB/T 4744）．承压设备产品焊接试件的力学性能检验．
[12] HG/T 2806—2009. 奥氏体不锈钢压力容器制造管理细则．

不锈钢焊接及质量控制

The Second Edition
第二版

BUXIUGANG HANJIE
JI ZHILIANG KONGZHI

ISBN 978-7-122-22504-7



销售分类建议: 机械/焊接

定价：98.00元